

磁性流体を利用した研削型超精密研磨法の開発研究

著者	黒部 利次
著者別表示	Kurobe Toshi ji
雑誌名	平成9(1997)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	1996-1997
ページ	109p.
発行年	1998-03
URL	http://doi.org/10.24517/00049341



磁性流体を利用した研削型超精密研磨法の 開発研究

(課題番号：08650130)

平成8年度～平成9年度科学研究費補助金（基盤研究(C)）
研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 黒 部 利 次

(金沢大学工学部教授)

は し が き

研究組織

研究代表者：黒部 利次（金沢大学工学部教授）

研究経費

平成 8 年度	2, 0 0 0 千円
平成 9 年度	3 0 0 千円
計	2, 3 0 0 千円

研究発表

- (1) Y. YAMADA, T. KUROBE, K. YAMASITA : Magnetic Field- Assisted Grinding-like Polishing of Brittle Mterials, in Advances in ABRASIVE TECHNOLOGY, L.C. Zhang and N. Yasunaga Ed. (World Scientific) Singapore ・ New Jersey ・ London ・ Hong Kong, 1997, July.
- (2) 坂谷 勝明, 黒部 利次, 山下 勝久, 廣崎 憲一：磁性流体を利用した G L P (Grinding-like Polishing) の研究, 精密工学会秋季大会学術講演会, 平成 8 年 9 月 .

目次

第1章 序論

1.1 はじめに.....	1
1.2 研究目的と意義.....	1
1.3 研究の概要.....	2

第2章 磁性流体を利用した研磨法

2.1 流体潤滑を利用した超精密研磨.....	4
2.2 磁性流体について.....	5
2.3 磁性流体利用の磁気研磨.....	7
2.3.1 磁性流体中に砥粒を混入する方式.....	8
2.3.2 磁性流体封止方式.....	9

第3章 磁性スラリーによる研磨機構の理論的考察

3.1 はじめに.....	10
3.2 加工原理.....	10
3.3 研磨機構の理論的考察.....	11
3.3.1 磁性スラリー内の砥粒にかかる力.....	11
3.3.2 砥粒の運動.....	16
3.3.3 除去量.....	17

第4章 実験装置および評価項目

4.1 はじめに.....	20
4.2 実験装置および実験方法.....	20
4.2.1 装置の構成.....	20
4.2.2 装置の詳細と仕様.....	21

4.2.3 供試材について.....	26
4.2.4 磁性スラリーについて.....	27
4.2.5 実験手順.....	28
4.3 評価方法.....	29

第5章 平形ポリシャ方式研磨装置における実験結果

5.1 はじめに.....	32
5.2 溝研磨加工に関する実験結果と考察.....	34
5.2.1 加工時間の影響.....	34
5.2.2 ポリシャの回転数の影響.....	39
5.2.3 クリアランスの影響.....	40
5.2.4 砥粒径の影響.....	45
5.2.5 研磨半径の影響.....	49
5.2.6 加工に及ぼす磁性流体の粘性の影響.....	50
5.2.7 磁場強度と磁場勾配の影響.....	53
5.2.8 A F M (Atomic Force Microscope) による加工痕の観察.....	65
5.3 平面研磨加工に関する実験結果と考察.....	69
5.3.1 研磨回数の影響.....	69
5.3.2 磁場強度と磁場勾配の影響.....	73
5.3.3 クリアランスと送り速度の影響.....	75
5.3.4 砥粒径の影響.....	77
5.3.5 S E M (Scanning Electron Microscope) による加工面の観察.....	78
5.3.6 E S C A (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) による表面分析.....	80
5.3.7 鏡面創成実験.....	83
5.4 本章のまとめ.....	85

第6章 カップ形ポリシャ方式研磨装置の研磨特性

6.1 はじめに.....	86
6.2 実験装置および実験方法.....	86

6.3 実験結果および考察.....	89
6.3.1 定位置研磨加工に関する実験結果と考察.....	89
6.3.2 平面研磨加工に関する実験結果と考察.....	99
6.4 本章のまとめ.....	101
第7章 総括.....	102
謝辞.....	104
参考文献.....	105

第1章 序論

1.1 はじめに

情報機器や精密機器が高性能化，小型化するにともなって，それに搭載されている電子・光学部品の加工精度に対する要求が一段と厳しくなっている．形状精度や表面粗さなどの幾何学的精度の完全性だけでなく，結晶学的にも完全に近い面を創成することが求められている．電磁氣的・光学的機能を有するこれらの機能性素子は，一般に硬ぜい性材料である場合が多い．通常，このような硬ぜい性材料部品の加工では，まず研削加工により形状創成を行い，その後に研磨により形状修正と表面粗さの低減を行う方法が採られている．

現在，硬ぜい性材料の仕上げ加工法として提案，開発されている研磨法の中に，F F F (Field-assisted Fine Finishing) ¹⁾ と呼ばれる加工法がある．これは電場や磁場などにより微粒粉末砥粒に力を与えてその運動を制御して表面研磨を行う方法で，加工能率などを電磁氣的に制御することが可能である点や自由曲面の研磨加工にもある程度利用可能である点などから注目されている．このF F F加工の1つに，磁性流体を利用した研磨法がある^{2) 3)}．この研磨法は，磁性流体が磁気に感應する性質と普通の流体と同じ流動性を合わせもつことを利用して，制御可能でファインな流体研磨を実現しようとするものである．

1.2 研究目的と意義

砥粒加工を行う場合，できるだけ加工物表面に対する砥粒の垂直方向分力が小さな値になること，つまり，加工物表面にできるだけ平行に近い角度で砥粒を作用させることが望ましい．これにより，加工試料の転移欠陥をさけて破壊を起こすことができ，高品位な加工面を得ることができる⁴⁾．また，加工能率を大きくするためには，砥粒にできるだけ大きな運動エネルギーを与えて加工物表面に作用させてやる必要がある．

ほとんどの超精密ポリシ加工の場合、砥粒に運動エネルギーを与える方法として、ポリシャと加工物表面の隙間に生じる流体の流れを利用している。そのため流体の流動状態を考慮しなければならない。流体の流動状態は、その速度が大きくなるにつれて層流から乱流に移行し、乱流の状態では流れが乱れ、砥粒の運動が一様でなくなるため、加工面に悪影響を及ぼすと考えられる。したがって、砥粒を加工物表面にできるだけ平行に作用させるためには、流体の流動状態は層流が望ましく、そのためポリシャの回転速度を過度に上げることはできない。そこで、FFF加工では加工能率を向上させるため、砥粒に与える力を制御する手段として、電場や磁場の力を応用している。

通常、非接触型の超精密ポリシ加工では、加工液中に加工物を浸して加工を行うため、加工液を溜める研磨液槽が必要となる。それゆえこれらの加工は、研磨加工を行った後の最終仕上げ研磨として、別の研磨加工機に加工物を移し変えて行われるため、加工能率や形状精度の低下の要因となっている。加工物の移し換えは仕上げ精度や生産性の向上の観点からは不必要な工程である。

本研究は、溶媒に磁性流体を用いた加工液（以後磁性スラリーと称す）を用いることにより、良好な幾何形状と結晶学的性質を持つ加工面を創成するとともに、加工液を溜めるための研磨槽や加工物の移し換えを必要としない、研削加工と研磨加工を一体化した新しい研削加工型の最終仕上げ研磨法の開発を目指している。

1.3 研究の概要

以下に各章の概要を説明する。

第2章では、まず本研究の基礎となっている流体潤滑を利用した超精密研磨法の基本原理について述べ、次に磁性流体の特性および従来の磁性流体利用の磁気研磨法についてまとめている。

第3章では、磁性流体中の砥粒の運動状況を力学的、電磁気学的式を用いて表現し、また、J.G.A.Bitterのブラスト加工に関する理論式を用いることによって、磁性スラリーを用いた研磨法の加工機構を理論的に考察している。

第4、5章では、平形研削砥石のような形状を有した回転工具（ポリシャ）と、加工物を回転させる回転軸（ワーク軸）に永久磁石を組み込むことで、研磨液槽を

必要としない非接触型の磁性流体研磨装置を試作し、シリコンウエハやフロートガラスの研磨実験を行って、磁性流体の種類や砥粒径、磁場強度などが加工量や表面粗さにどのような影響を与えるかについて考察している。また加工面の幾何学的、化学的な表面性状を評価する方法としてAFM（原子間力顕微鏡）およびESCA（X線光電子分析装置）を採用し、研磨面の表面性状について評価している。

第6章では、カップ形砥石のような形状をしたポリシャを有する非接触型の磁性流体研磨装置を試作し、平面研磨実験を行って、研磨能率、表面粗さについて基本的研磨特性を調べている。

第7章では、本研究で得られた事柄の総括を行っている。

第2章 磁性流体を利用した研磨法

2.1 流体潤滑を利用した超精密研磨

加工における破壊の最小単位は原子のオーダであると考えられ、原子の単位で加工することができれば、仕上げ面の精度を原子のオーダにまで近づけることも可能である。このような原子のオーダでの除去加工の例としては、電解研磨や化学研磨などの電気化学的加工法や電子ビーム加工やイオンビーム加工などの物理的加工法がある。しかし、実際の加工においてはそれほどよい精度は実現されていない。この理由は、前者では材料の不均一性や内部の微視的欠陥の分布などのために選択的加工がなされるためであり、後者ではエネルギーの供給される領域が大きく、熔融現象が優先し、また工具としての電子やイオンが材料表面下に侵入するため、内部に熱的変質あるいは多数の点欠陥が発生し、加工表面層の物性が損なわれるからである。

そこで近年、損傷なしに表面原子を選択的に除去するには、電子やイオンより大きな工具で機械的に加工エネルギーを供給するのが有利であるとの考えに基づいて、各種の超精密ポリシ加工法が光学素子などの脆性材料の最終仕上げ加工として実用化されている。例えば、EEMと称する加工法はポリウレタン球をポリシ工具として加工液中で回転させ、加工面との間にできる流体潤滑膜を利用して粉末砥粒を加速し、ポリシ工具の走査により面研磨を行う。また、フロートポリシングと呼ばれる加工法では段付きのラップ状工具を高速に回転して、その動圧効果により形成される加工液膜の流動作用により加工を行う。さらに最近では、これらの方法にメカノケミカルポリシングなどを応用することにより、砥粒をまったく用いないで加工液の反応性だけを利用する方式も実用化されている⁵⁾。

しかし、これらの加工法は加工単位が非常に小さく、加工変質層を極小化できる利点がある反面、粉末砥粒の加速手段に流体の流れを用いており、その加工単位が微小であるほどその流体の流動状態を考慮に入れる必要がある。また、その流体の流路幅が決まっているときには、その流速は一定限度内に制限されるため、加工能率がきわめて低いという問題があり、加工能率を向上させるには他の手段で微粒粉

末砥粒に力を与えてその運動を制御する必要がある。

2.2 磁性流体について^{6) 7)}

磁性流体 (Magnetic fluid) は、液相中にコロイドサイズ (150 Å 以下) の強磁性微粒子を分散させた、磁気に感應する可動流体で、強磁性微粒子としてマグネタイトやフェライトなどを用いた酸化物磁性流体と鉄やコバルトなどを用いた金属磁性流体がある。分散媒としては、水、炭化水素、エステル、ジエステル、ポリフェニルエーテル、フッ化炭素などが使用されている。また、分散粒子の分散安定化を図るため、疎水基を液相側に向けた界面活性剤 (オレイン酸) を吸着させている。金属磁性流体は今のところ安定な分散を得ることが難しく、市販のほとんどの磁性流体は酸化物磁性流体である。

磁性流体は、1965 年にアメリカの S.S.Papell によって研究開発されたもので、次のような性質を有している。

- (1) 粒子 1 個あたりの磁気モーメントが極めて大きく、超常磁性の性質を有する。
- (2) 重力による沈降、磁場による粒子の凝集や分離などが起こらず、安定なコロイド分布状態をとっている。
- (3) 磁化曲線はヒステリシスを示さず、したがって保持力を有しない。
- (4) 磁場とともに磁化は増大するが、高い磁場でも飽和しにくい。
- (5) 外部磁場により粘度が変化する。
- (6) 磁性流体薄膜に磁場を加えると、磁気光学効果により複屈折性が生じる。
- (7) 磁場下におかれると、伝播する音波に速度や減衰の異方性が生じる。

強磁性体微粒子としてマグネタイト (Fe_3O_4) を用いる磁性流体の製造方法としては、次のようなものがある。

(1) 粉碎法 (Papell ら)

また、マグネタイトをオレイン酸を含むケロシン溶液中で長時間粉碎し、遠心分離により粗大粒子を除去した後、濃縮または希釈する方法。

(2) 水溶液中吸着－有機相分散法 (下飯坂ら)

硫化第一鉄 (FeSO_4) と硫化第二鉄 ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) を水酸化ナトリウム中で加熱、

冷却してマグネタイト微粒子を作成し、水溶液中でオレイン酸イオンを吸着させて、水洗、脱水後、シクロヘキサン中に分散させる方法。

(3) 解膠法 (Reimer & Khalafalla ら)

塩化第一鉄 (FeCl_2) と塩化第二鉄 (FeCl_3) に水と水酸化アンモニウムを加えてマグネタイトを作成し、オレイン酸を含むケロシン中で分散させる方法。

磁性流体は、当初宇宙ロケットの液体燃料移送用として研究開発されたが、現在では多方面での応用、実用化が行われている。代表的な応用例として次のようなものがある。

(1) 軸シール

回転軸のシールとして、異物の侵入防止、潤滑油やガスの漏洩防止を目的に用いられ、メカニカルシールなどに比べ、気密性が高い、軸の回転摩擦損失が少ない、軸表面の粗さの影響を受けにくい、騒音や摩擦熱の発生が少ない、加圧方向の制限を受けないなどの特長がある。

(2) 比重差選別

磁性流体を磁気勾配下におくと、体積力としての磁気力がはたらくため、見かけ上の比重が非常に大きな液体となり、液体中の非磁性体には磁場の弱い方向に向けて力がはたらく。この性質を利用すると、比重の異なる金属を自動的に選別することができる。

(3) ダンパー

磁性流体に磁場を加えたときに発生する保持力や粘度変化を利用して、物体の運動を制御するためのリニヤダンパー、回転粘性ダンパー、ダッシュポットなどの開発が行われている。

(4) センサー

磁性流体を応用したセンサーには、磁気力を利用した傾斜センサー、加速度センサー、回転速度センサー、磁気光学現象を利用した磁場センサー、磁化の温度依存性を利用した温度センサーなどがある。

(5) その他

磁気光学効果を利用した光シャッターや光モジュレータ、熱交換機能を利用したエネルギー変換システム、磁気力を利用したアクチュエータ、バルブ、ジェットプリン

タなどがある。

2.3 磁性流体利用の磁気研磨

一般に、磁場の作用下でゆっくり動く磁性流体は粘性および圧縮性のない理想流体とみなせるため、次のベルヌーイの式が適用できる⁶⁾。

$$\frac{1}{2}\rho u^2 + \rho gh + p - \int_0^H M dH = \text{const} \quad (2.1)$$

ここで、 ρ は磁性流体の密度、 u は磁性流体の速度、 g は重力加速度、 h はある基準点からの高さ、 p は圧力、 M は磁化、 H は磁場を表す。

磁性流体を利用した磁気研磨法は、式 (2.1) で表される磁気力による圧力変化を利用して、砥粒に作用する研磨圧などを制御して加工を行う方法で、これまで種々の方式が提案されている⁸⁾。その原理は大別すると2通りあり、一つは磁性流体中に砥粒を混入する方式、もう一つは磁性流体封止方式である。これまでに提案されている磁性流体利用の磁気研磨法を図 2.1 に示す。

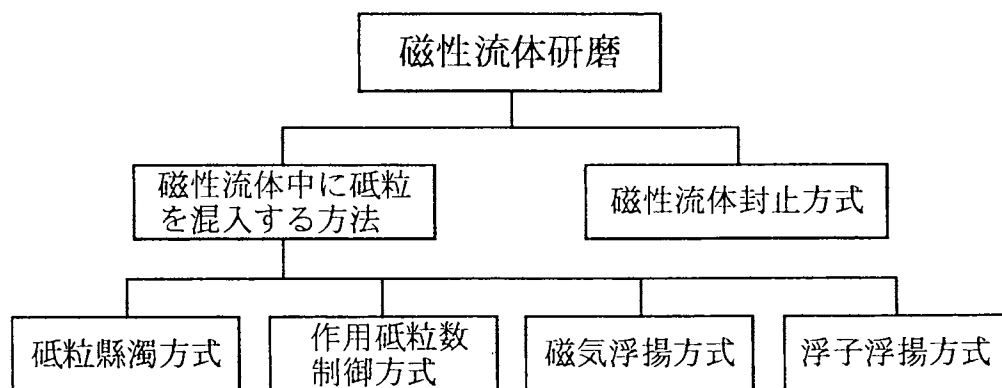


図 2.1 磁性流体利用の磁気研磨法

2.3.1 磁性流体中に砥粒を混入する方式

この方式には、砥粒懸濁方式、作用砥粒数制御方式、磁気浮揚研磨、浮子浮揚方式などがあり、作用砥粒数制御方式の例を図 2.2 に示す。

この方式は、砥粒を磁性流体中に均一に懸濁させるのではなく、あらかじめ穿孔したポリシャ（ポリウレタンシート）の穴の中に入れておき、それを磁性流体の作用（比重差選別の原理）により逐次ポリシャ上に移送する方式を採っている。磁場勾配を重力方向にとると、磁場の作用によって非磁性体である砥粒には浮力が生じ、その結果ポリシャ表面に砥粒が供給され、電磁石に流れる電流を調節することにより、研磨に関与する作用砥粒数を制御して、効率的研磨を行うことが可能になる。穿孔したポリシャは黄銅盤に貼ってあり、ポリシャ容器には磁性流体が適量入れられている。

黄銅盤を固定した回転軸はスライド玉軸受により支持され、スラスト軸受を介してペローズと接している。加工圧は油圧により軸を上下方向に滑らかに変位させて発生させ、上部回転軸に取り付けられた加工物は、ポリシャと同一の回転数で回転する。この装置により、磁場が大きいほど加工量が増すことが確認されている。

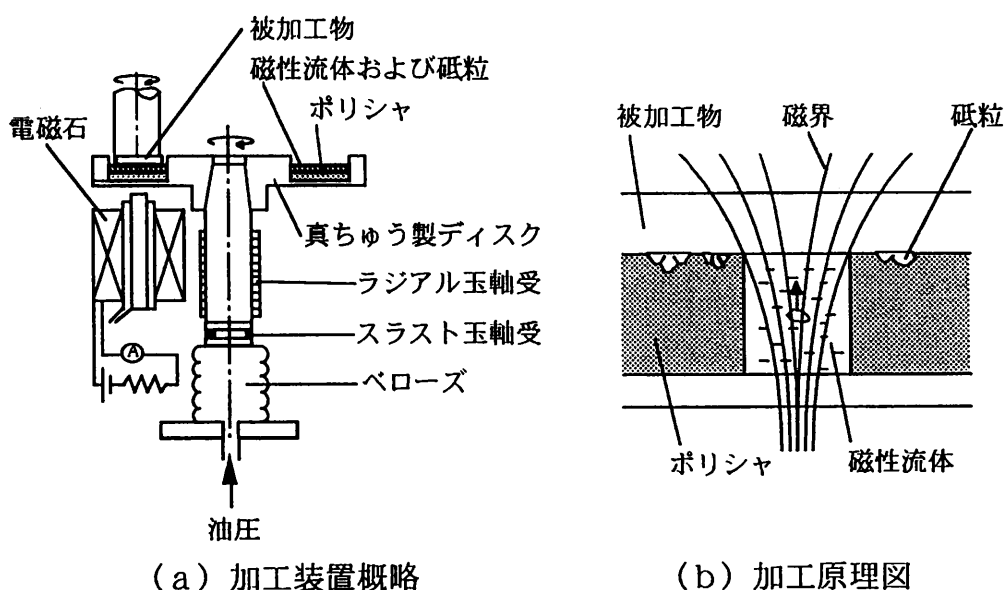


図 2.2 作用砥粒数制御による加工法

2.3.2 磁性流体封止方式

この方式は、ゴムシートを介して砥粒と磁性流体を配置する加工法で、ゴムシートがポリシャの役目をする。図 2.3 に示すように、黄銅盤上のリング状幅広溝内に満たされ磁性流体を伸縮性のあるゴムシートで覆ってポリシ皿がつくられている。このポリシ皿の上に水に砥粒を懸濁した加工剤が入れている。上部鉄心に取り付けられた加工物は、ゴムシートに加工面が接した状態に置かれていて、加工物とポリシ皿が回転することにより加工作用が起こる。上下方向から磁場が印加できるように配置された電磁石に電流をすと、磁性流体は磁極の方に引き寄せられて、ゴムシートが上方向に膨らんで加工物にポリシ圧力を与える。加工圧の設定は、電磁石に流す電流値を変化させることにより制御できる。この装置による実験から、磁場強度が増すほど加工量は増加し、加工面粗さは小さくなることが確認された。

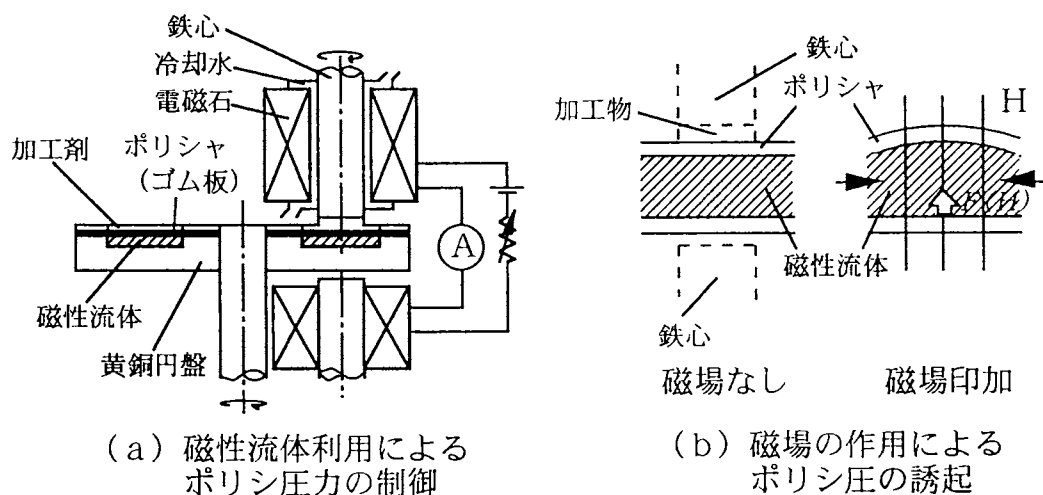


図 2.3 磁性流体封止による加工法

第3章 磁性スラリーによる研磨機構の理論的考察

3.1 はじめに

実験を行う前に、磁性スラリーを用いた研磨加工の加工メカニズムを考えてみる。本加工法は、ポリシャと加工面の間の微小な隙間に発生する流体の流れを利用して加工を行うものである。さらに、磁場を印加することによって磁性スラリー内の砥粒に磁氣的に力を加え、加工面に作用する砥粒数を決定し、加工量の制御を行うものである。

3.2 加工原理

実験に用いる装置の加工原理は以下の通りである。ポリシャ内に組み込まれた永久磁石の磁氣力を利用することにより、加工液である磁性スラリー（磁性流体＋砥粒）をポリシャ外周に保持させる。ポリシャを回転させると、流体の粘性に起因する効果からスラリーはポリシャに付着する形でつれまわる。そのポリシャを被加工物に近づけることによって加工を行っている。このときポリシャ加工面に対して非接触状態にあるため、加工面への垂直方向の力がほとんど作用しない流体研磨となる。研磨方法の原理図を図 3.1 に示す。

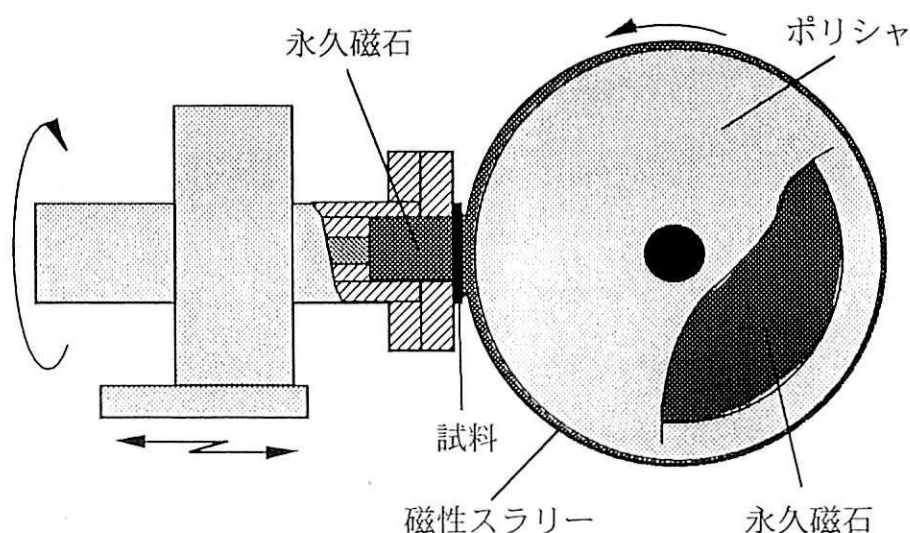


図 3.1 研磨方法の原理図

平形ポリシャ方式研磨装置は、ワーク軸およびポリシャ内に組み込まれている永久磁石の相対的位置や、ポリシャの回転数を意図的に変化させることによって磁性スラリー内の砥粒に働く力の大きさや方向を変え、加工面に作用する砥粒数と研磨力を制御する能力を有している。

3.3 研磨機構の理論的考察

3.3.1 磁性スラリー内の砥粒にかかる力

研磨機構を考える上で砥粒の運動を知ることは非常に大切なことである。したがって、砥粒の運動を知るためにいくつかの理論式を用い、単一砥粒にかかる力を力学的、電磁気学的に考えてみることにする。

(1) 磁気圧による力⁶⁾

磁性スラリーに磁場を印可すると、磁性流体中に懸濁している非磁性体の砥粒に外力が作用する。これを磁気圧といい、磁場印加に起因する磁性流体内の圧力分布から生じる。またこの現象は磁気圧効果と呼ばれている。

図 3.2 は磁気圧力の効果について模式的に示したものである。本原理は、2.2 節で紹介した磁性流体を利用した比重差選別法の原理と同じである。磁性スラリー利用

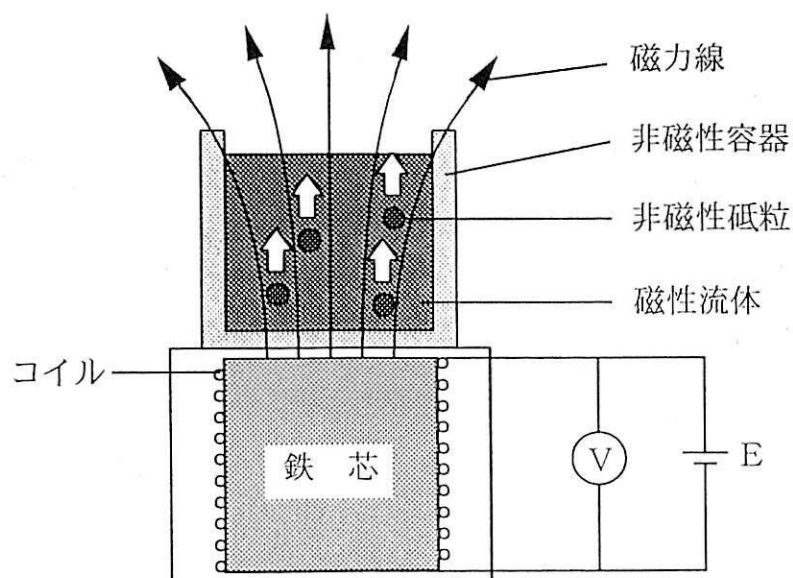


図 3.2 磁気圧効果

の加工法は、磁性流体を利用した比重差選別法に着想を得て開発したものである。

以下に、磁気圧力の効果について詳述する。

図 3.2 に示す容器には、磁性スラリーが入れている。容器と砥粒は非磁性体である。容器下部には電磁石が取り付けられている。いま、電磁石のコイルに電流を流すと磁場が発生する。図中の磁力線分布からもわかるように、磁石近傍での磁性流体内では強い磁場が作用するのに対し、容器上方では弱い磁場が作用している。この非一様な磁場分布のため、磁性流体内の圧力は重力場での静水圧に磁気圧が作用し、非一様な圧力分布が形成される。つまり、磁石近傍での圧力は高くなり、容器上方の圧力は低くなる。この状態では、通常なら物体の密度が磁性流体の密度より大きく、容器の底に沈むような物体でも、磁気圧の効果により圧力の低くなる容器上方に浮遊させることができる。このため、磁性流体中の物体には、次式で表される力 F が作用する。

$$F = \frac{\pi}{6} d^3 \{(\rho_f - \rho_s)g - \mu_0 M \nabla H\} \quad (3.1)$$

ここで、 ρ_f 、 ρ_s はそれぞれ磁性流体と流体内の非磁性体の密度、 μ_0 は真空中の透磁率、 M は非磁性体位置における磁性流体の磁化の強さの平均値、 ∇H は非磁性体まわりの狭い領域での磁場勾配、 d は球形と仮定した非磁性体の直径である。

この原理を本実験装置にあてはめて考えると、砥粒は流体内に浮遊しているからアルキメデスの原理に基づく力の第一項は無視することができる。したがって砥粒にかかる磁気圧は次式で表され、磁場勾配の正負によりポリシャまたは加工物表面側に移動することになる。

$$F = - \frac{\pi}{6} d^3 \mu_0 M \nabla H \quad (3.2)$$

(3.2) 式に記されている磁性流体の磁化 M は、磁性流体に印加されている磁場の大きさによって決まる。磁性体の磁化についての詳細な理論的考察によると、常磁性体の磁化 M は式 (3.3) のようにラグジュバン関数を使って表される。

$$M = N m L\left(\frac{m H}{k T}\right) \quad (3.3)$$

ここで、 $L(\xi) = \coth \xi - 1/\xi$ (ラグジュバン関数)

通常、粒子の磁気モーメント m （粒子の体積と粒子の飽和磁化の積）と粒子の数密度 N を直接正確に測定することは困難である。したがって、数密度 N は、マグネタイト粒子（密度 5.2 g/cm^3 ）が粒径 100 \AA の球形と仮定することにより、磁性流体中のマグネタイト粒子の質量濃度から求めることとした。また、磁気モーメント m の値は磁性流体の飽和磁化 M_s （ $= Nm$ ）を数密度 N でわることによって求めた。式（3.3）を用いて磁性流体の磁化 M の値を計算するに当たって、表 3.1 に示す諸々の値を用いた。計算結果を図 3.3 に示す。

表 3.1 磁化計算のための諸々の値

	W-40	HC-50	PA-40	LS-40
飽和磁化 (T)	0.038	0.048	0.029	0.031
粒子数 N ($1/\text{m}^3$)	3.08×10^{23}	2.55×10^{23}	2.73×10^{23}	2.91×10^{23}
磁気モーメント m ($\text{Wb} \cdot \text{m}$)	1.23×10^{-25}	1.88×10^{-25}	1.06×10^{-25}	1.05×10^{-25}
温度 T (K)	298			
ボルツマン定数 k (J/K)	1.36×10^{-23}			

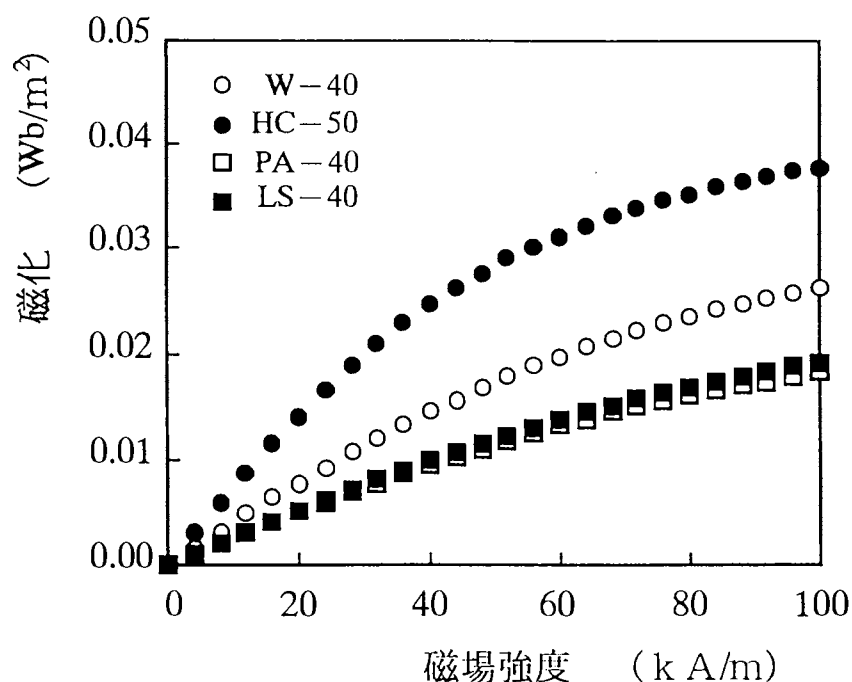


図 3.3 磁性流体の磁化の計算結果

図 3.3 から、同一な磁場強度と磁場勾配下では、HC-50 の磁性流体の磁化が一番大きく、それから W-40, LS-40, PA-40 の順となることがわかる。したがっ

て、磁性流体中の非磁性体が一定体積を持つ場合、上述の順に大きな磁気圧を受けることになる。

(2) 遠心力による力^{7) 9)}

ポリシャを回転させると遠心力が生じ、砥粒は磁性流体内で半径方向に力を受ける。遠心力による力を F とすると、 F は次式で表される。

$$F = \frac{\pi}{6} (\rho_g - \rho_f) d^3 \frac{V_a^2}{r} \quad (3.4)$$

ここで d は砥粒径、 V_a はポリシャとワークの回転から生じる流体の速度、 r はポリシャ回転軸からの距離、 ρ_f 、 ρ_g はそれぞれ磁性流体と砥粒の密度である。 V_a は流体の速度ではあるが、砥粒はその位置において流体と同じ速度で円周方向に運動していると考えられるため、砥粒の速度として差し支えない。

磁性流体を非圧縮性粘性流体と仮定した場合のナビエ・ストークスの式は (3.5) のように表される。この式において、普通の流体のナビエ・ストークス方程式と異なるのは右辺の第3項だけである。

$$\begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - M_x \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + f_x \\ \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - M_y \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} \right) + f_y \end{aligned} \quad (3.5)$$

そこで、 x y 座標系を図 3.4 に示すように、二次元平行流路の下側の固定壁面に対し、上側の壁面が一定速度で移動する場合の流れを考える。ここで、次のような仮定を置いて考察を進めることにする。

- ・ニュートン流体で、非圧縮性である。
- ・加工液の慣性力は粘性力に比較して小さく、無視できる。
- ・流れは層流であり、加工液の粘性は一定である。
- ・加工液膜の厚さ方向に圧力は変化しない。
- ・固体表面と加工液間にすべりは生じない。

上記の仮定から、式 (3.5) は次のようになる。

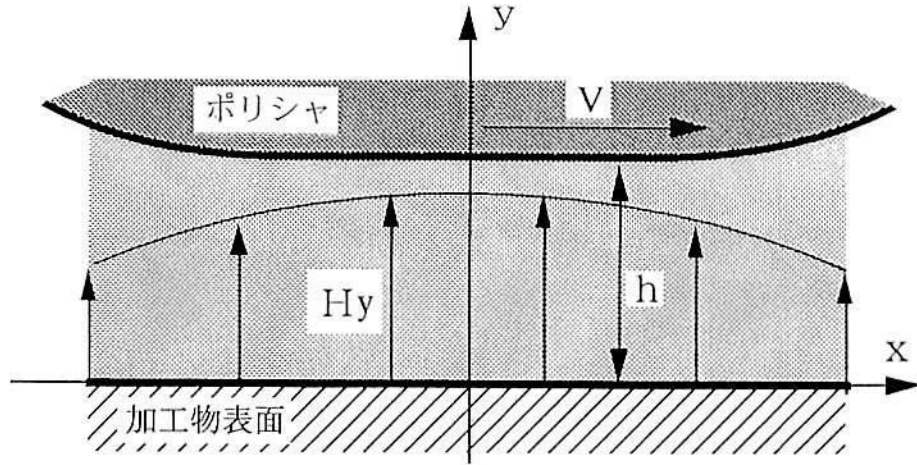


図 3.4 座標系

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.6)$$

ここで, u : 流体の x 方向の速度

式 (3.6) より, 磁場 Hy は x 方向の流れに関係しないことがわかる.

式 (3.6) を, 次の境界条件: $y=0$ で $u=0$, $y=h$ で $u=V$ を代入し積分すると, 式 (3.7) が得れる.

$$u = V \left\{ \frac{y}{h} - P \frac{y}{h} \left(1 - \frac{y}{h} \right) \right\} \quad (3.7)$$

$$\text{ただし, } P = \left(-\frac{dp}{dx} \right) \frac{h^2}{2\mu V}$$

ここで, ポリシャの曲率半径が, ポリシャと加工物の隙間より非常に大きく, また外部からの流体の流入がないと仮定すると, 式 (3.7) の P の中の dp/dx は零とみなすことができる. したがって, 式 (3.7) は次式のように書くことができる.

$$u = V \frac{y}{h} \quad (3.8)$$

ここで, 砥粒径を d とすると, 被加工面上の砥粒の速度 V_a は

$$V_a = V \frac{d}{2h} \quad (3.9)$$

となる. 式 (3.9) から, 被加工面上の砥粒の速度はポリシャ周速度と粒径に依存することがわかる.

3.3.2 砥粒の運動

せん断流れ中の単一砥粒の円周方向および半径方向の移動運動は式 (3.10), (3.11) で表される^{10) 11)}.

$$m \frac{dV_a}{dt} = 3 \pi \mu d (U_a - V_a) + F_a \quad (3.10)$$

$$m \frac{dV_r}{dt} = 3 \pi \mu d (U_r - V_r) + F_r \quad (3.11)$$

ここで, m : 砥粒の質量 $U_{a,r}$: 円周および半径方向の流体の速度
 d : 砥粒の直径 $V_{a,r}$: 円周および半径方向の砥粒の速度
 $F_{a,r}$: 円周および半径方向の外力

いま, 本実験装置に関する研磨機構を考える上で最も重要なのは, 半径方向の砥粒の運動である. 以下に, そのことについて検討する.

砥粒が完全な浮遊状態にある場合, 砥粒に作用する重力と浮力は釣り合っていると考えられる. したがって, 砥粒に作用する浮力と重力が打ち消しあった形に関する半径方向の外力 F_r は, 次式 (3.12) で表される. 式 (3.12) では 3.3.1 項で挙げた砥粒に作用する力を考慮している.

$$F_r = -16.2 (U_a - V_a) d^2 \sqrt{2 \rho_f \mu \omega} \quad (3.12)$$

$$+ \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho_f) d^3 \frac{V_a^2}{r} \pm \frac{\pi}{6} d^3 \mu_0 M \nabla H$$

ここで, μ : 磁性流体の粘度 ω : 砥粒の自転角速度
 $\rho_{f,s}$: 磁性流体および砥粒の密度 r : ポリシャの半径
 μ_0 : 真空中の透磁率 M : 磁性流体の磁化
 ∇H : 磁場勾配

式 (3.12) の右辺第 1 項は砥粒の自転による揚力, 第 2 項は遠心力, 第 3 項は磁気力を表している. しかし, 砥粒の円周方向の速度は流体の速度とほぼ等しいものと仮定すると, 外力としては第 2 項と第 3 項となる. ここで, 第 3 項の符号が正負両方をとるのは, 磁場勾配の符号の変化により磁気力の方向が変わるためである.

式 (3.11), (3.12) に基づいて、砥粒の運動について考察する。磁性スラリー内の砥粒は、ポリシャとワークの回転力に起因する流体の流れを受けて、ポリシャの円周方向に運動を行うことになる。この速度は、流体の粘度に依存せず、むしろ砥粒径に依存する。円周方向に、ある速度を持って運動する砥粒には、遠心力（加工面の方向）が発生する。それと同時に砥粒は磁気力を受ける。その強さは、砥粒が位置する場所できまる磁場の強さと磁場勾配によって定まる。磁気力は、砥粒の体積にも依存する。それらの力をベクトル表示すると、関係は図 3.5 に示す通りとなる。また、式 (3.11) からわかるように、 x 軸方向の砥粒の速度は加工液の粘性が高いほど遅くなり、このため、加工面に作用する砥粒の入射角は小さくなると予想される。

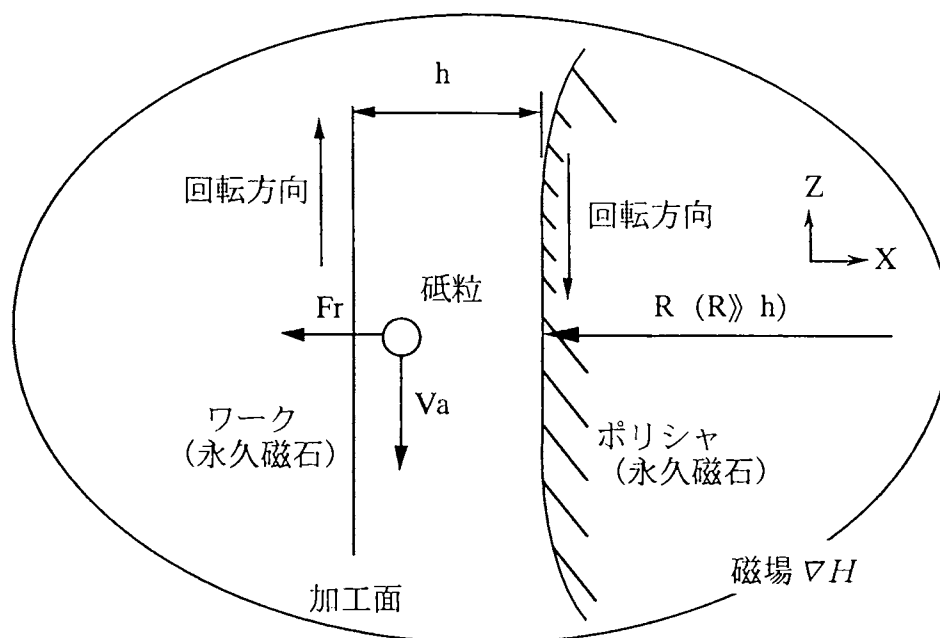


図 3.5 単一砥粒にかかる力

3.3.3 除去量

砥粒を混入した流体に、ポリシャを回転させる等して速度を与え、砥粒を加工物表面に衝突させるという本研磨法は、噴射加工のそれに似ているように思われる。噴射加工による除去体積（量） W_t に関しては、J.G.A.Bitter^{1,2)} が解析を行っている。 W_t を、砥粒の加工物表面に垂直な分速度による量 W_d (deformation wear) と、それ

に平行な成分による切削項 W_c (cutting wear) とに分け、エネルギー的視点から考察を行っている。本実験に関しても、Bitterによる噴射加工の除去量の式を参照して、加工量の変化を推察を試みる。

硬ぜい性材料では、 W_d は、材料の微小破砕に基づくチップの離脱によるものであり、一方、 W_c はせん断破壊を主な機構として生じるものである。加工物表面に作用する砥粒の入射角 α が小さく、噴射粒子が加工物を離れるときにも、加工物表面に平行な方向の速度成分を持っているとした場合、全加工量 W_t は次式のように表される。

$$W_t = W_d + W_c \quad (3.13)$$

$$W_d = \frac{M(U \sin \alpha - U_t)^2}{2\varepsilon}$$

$$W_c = \frac{2MC(U \sin \alpha - U_t)^2}{(U \sin \alpha)^{\frac{1}{2}}} \left\{ U \cos \alpha - \frac{C(U \sin \alpha - U_t)^2}{(U \sin \alpha)^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

ここで $U_t = \frac{8 \pi^2}{9\sqrt{10}} y^{\frac{5}{2}} \kappa^6 \rho^{-\frac{1}{2}}$

$$\kappa = \left\{ \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$C = \frac{0.288}{y} \left(\frac{\rho}{y} \right)^{\frac{1}{4}}$$

ここで M ：噴射粒子の全質量 U ：噴射砥粒の速度

α ：噴射角

ε ：単位体積の加工量 W_d を生ずるに要する加工エネルギー

ϕ ：単位体積の加工量 W_c を生ずるに要する加工エネルギー

U_t ：接触部における最大圧縮応力が加工物の

弾性限界 y に達する限界噴射速度

ν_1, ν_2 ：砥粒，加工物のポアソン比

E_1, E_2 ：砥粒，加工物の縦弾性係数

ρ ：砥粒の密度

硬ぜい性材料に対して上記の解析結果を模式的に示したのが図 3.6^{1 2)}である。図 3.6 から、砥粒の入射角が大きくなるほど加工量が増加する様子がわかる。また、硬ぜい性材料では、 C と K の値が大きいので W_c の値が小さくなる。また、 ε の値も小さいため、 W_d の曲線の勾配が急となる。

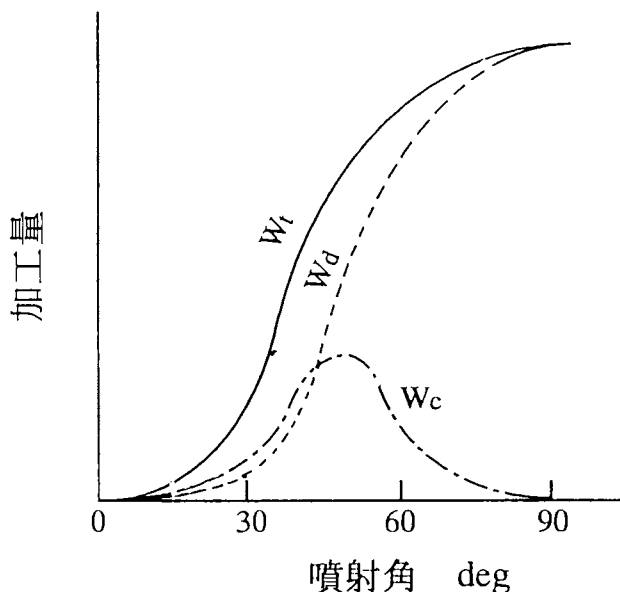


図 3.6 脆性材料の加工量曲線 (Bitter)

ここで、式 (3.13) を本実験に適用した場合の、研磨機構を考えてみる。

一般に、加工時間の増加は、式 (3.13) 中の M の増加と考えることができるため、加工時間の増加につれて加工量は大きくなる。ポリシャの回転数の増加は、砥粒にかかる遠心力を増大させ、それにより、加工物表面に作用する砥粒の速度と入射角を大きくし、加工量を増大させる。また、使用する砥粒の粒径を大きくすると、砥粒にかかる遠心力が増大し、それに伴って加工量も増大する。

一方、加工物とポリシャのクリアランスが増すと、式 (3.9) から加工物表面での砥粒の運動速度は当然小さくなる。それにより砥粒にかかる遠心力も小さくなる。このことにより、加工物表面に作用する砥粒の速度も、また、入射角も小さくなり、結果として加工量は減少する。一方また、粘度の小さい磁性流体を加工液の溶媒として用いると、砥粒の加工物表面への速度が大きくなる。このため、砥粒の加工物表面への入射角が大きくなり、加工量も増大する。

ワーク軸内部の磁石を動かし、その磁石が作る磁場の強度が増す方向の場合には、砥粒にかかる磁気圧が増し、加工量を低減させる方向に作用する。しかし、磁場勾配の変化から、磁気圧の発生の様態（方向）が変化する。その方向が加工物側に向くと、砥粒の加工物表面への入射角が大きくなる。このため加工量も増加することが予想される。

第4章 実験方法および評価項目

4.1 はじめに

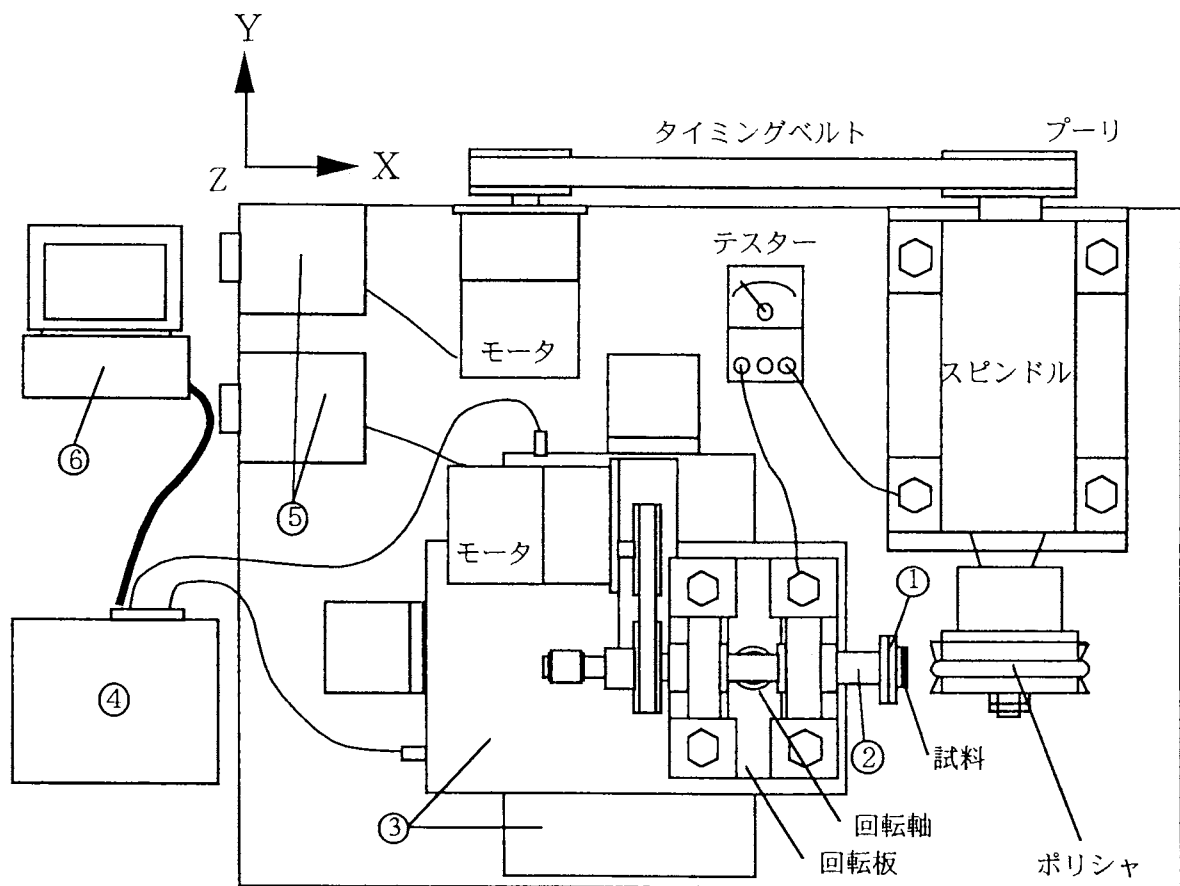
従来の研磨機の多くは、ポリシャに圧力を付与し、被加工物とポリシャとの間にスラリーを供給して研磨する方式である。このため、研磨条件が適切でなければ、材料に残留応力が発生し、ときには微視き裂（マイクロクラック）を誘発させることもある。本研究は、磁性スラリーを用いることによりフレキシビリティに富み、そして材料の表面性状を損なわない研磨加工法の開発を目的としている。

本章ではまず初めに、非接触型の平形ポリシャ方式の研磨装置を開発するとともに、それを利用してシリコンウエハ等の硬ぜい性材料の研磨加工を行う。本方式を採用することにより、材料表面に対する砥粒の垂直方向の運動成分（分力）が小さくなり、残留応力の誘起やマイクロクラックの誘発は極めて少なくなるものと思われる。基礎的な視点から本研磨法の特質を検討するため、加工原理を満たす簡潔な装置を試作し、シリコンウエハについて研磨実験を行った。その結果、二、三の興味ある知見を得た。

4.2 実験装置および実験方法

4.2.1 装置の構成

平形ポリシャ方式研磨装置の概略図を図 4.1 に示す。装置は大別して、ポリシャ部と送り機構を含むワーク軸部から構成されている。装置の概略寸法は $450 \times 600 \times 300$ （高さ）[mm] である。



- ① 試料ホルダ ② ワーク軸 ③ 精密型 X Y 軸ステージ
 ④ 2 軸パルスコントローラ ⑤ スピードコントローラ
 ⑥ パーソナルコンピュータ

図 4.1 研磨装置概略図

4.2.2 装置の詳細と仕様

(1) ポリシャ部

ポリシャ部とワーク部の概観図を図 4.2 に、ポリシャを上方から見た概略図を図 4.3 に示す。ポリシャは、非磁性体である黄銅に曲率 (R5mm) を付け、円盤状 (ϕ 94mm) に加工したものである。外周面に曲率を付けたのは、接触による自由曲面創成を目指し、且つ、ポリシャと供試材との距離 (平行度) を安定させるためである。ポリシャの外周面の回転精度は PV 値で約 4 [μ m] である。円盤内部には永久磁石が内蔵されている。また、ポリシャ内部に装着してある永久磁石は、回転軸に

沿って移動可能となっている。本磁石を動かすことによって磁場の強さ及び磁場勾配を変化させることができる。ポリシャ内部の磁石の移動は、図4.4に示すように、磁石ホルダに挟まれている磁石とスペーサの位置を変えることによって行う。永久磁石の極は磁石の側面にあるため、磁石強度の強い方にスラリーが吸い寄せられ、ポリシャ外周面に加工液が吸着しなくなる。このため、ポリシャ外周面に常に加工液を保持させるためには何らかの工夫が必要である。本装置では、ポリシャの両サイドに図4.3に示すように、アクリルカバーを取り付けている。

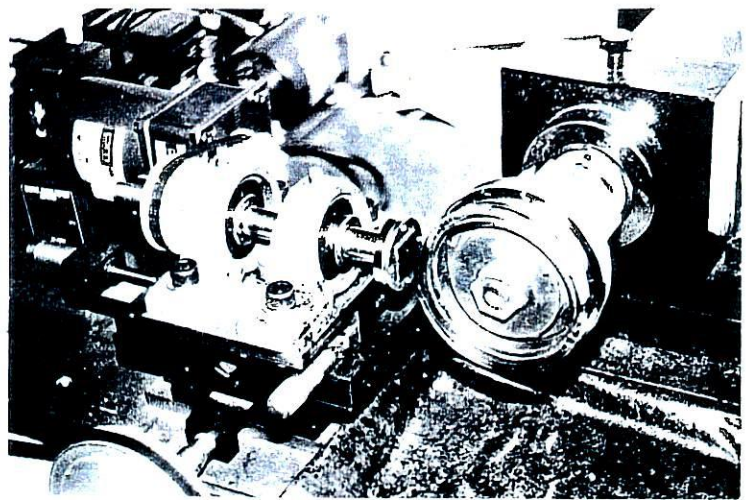


図 4.2 ポリシャ部とワーク部の概観図

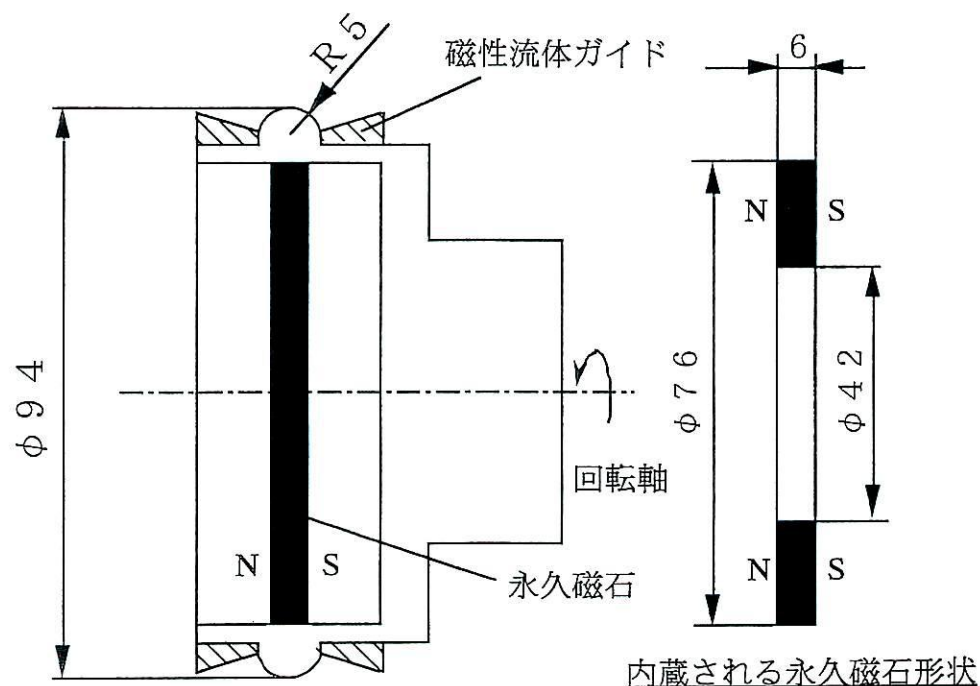


図 4.3 ポリシャの概略図

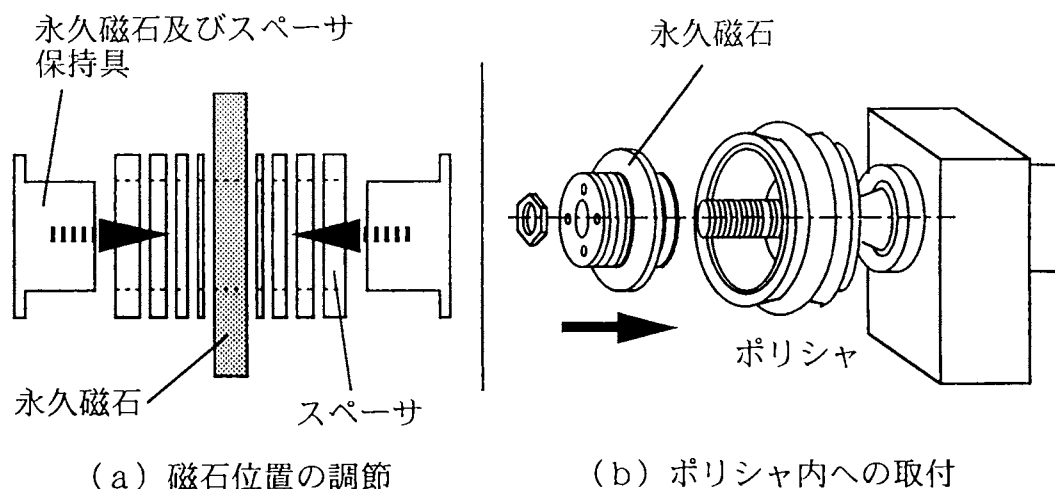


図 4.4 ポリシャ内磁石の位置調節

ポリシャに内蔵されている永久磁石の物性値を表 4.1 に示す。使用した永久磁石はネオジ磁石 (Nd-Fe-B) である。ネオジ磁石は、小型化、軽量化のニーズに最適の材料である。現在市販されている磁石のうちで、世界で最も強い磁石（ただし、80 [°C] 以下で使用）といえる。錆やすいのが欠点であるが、本装置では、磁石をポリシャ中に内蔵した形になっており、加工液に触れることがないので、錆による磁石強度の劣化は考えなくてもよい。

表 4.1 ネオジ磁石の物性値 (Nd-Fe-B)

残留磁束密度 (Br)	11000 Gauss
保磁力 (bHc)	10500 Oersted
保磁力 (iHc)	21000 Oersted
最大エネルギー積 (BHmax)	30×10^6 Gauss Oersted
Brの温度特性	-0.12 % /°C
キュリー点	310 °C
密度	7.4 g/cm ³

モータ（オリエンタルモータ（株））の駆動トルクは、図 4.1 に示すようにタイミングベルトで伝動する方式を採っている。トルクはスピンドルを介してポリシャに伝達される。ポリシャの回転は、スピードコントローラーにより 0～160 [rpm] の範囲で制御さる。回転は反時計回りの方向（図 4.2 参照）としている。

(2) ワーク部

ワーク部は次の構成要素からなっている．すなわち，モータ，プーリ，タイミングベルト，軸受け，精密型X Y軸ステージ，移動可能な磁石を内蔵するワーク軸，ワークホルダ（試料固定台）である．

ワーク軸の形状を図 4.5 に示す．ワーク軸は中空のパイプであり非磁性材であるステンレスで製作されている．ワーク軸にはマンガン・アルミの永久磁石 (Mn - Al) が組み込まれており，ワーク軸他端に装着してあるマイクロメータヘッドによってスライド可能な機構となっている．磁石は中心軸（心棒）に沿って動かされる．加工試料表面の磁場の強さは，磁石をスライドさせることによって制御する．永久磁石（マンガン・アルミ）の物性値と形状を表 4.2 に，ワーク軸先端での表面磁束密度を示す曲線を図 4.6 に示す．

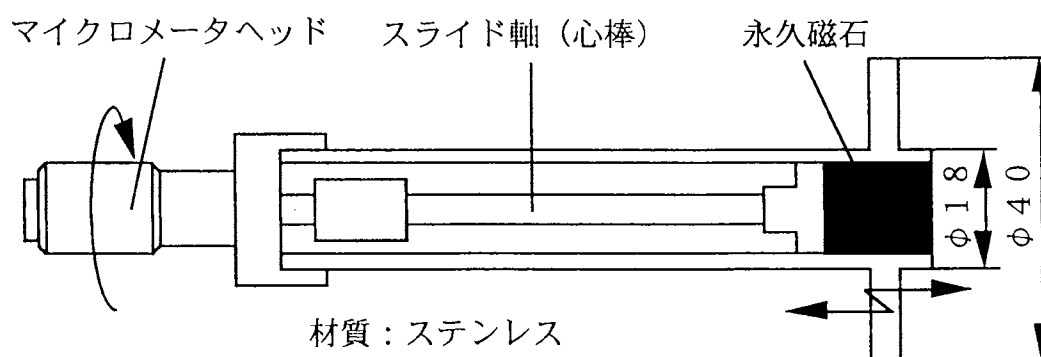


図 4.5 ワーク軸の概略図

表 4.2 マンガン-アルミ磁石の物性値 (Mn-Al)

残留磁束密度 (Br)	5500 Gauss
保磁力 (bHc)	2600 Oersted
保磁力 (iHc)	3300 Oersted
最大エネルギー積 (BHmax)	5.5×10^6 Gauss Oersted
Brの温度特性	-0.11 % / °C
キュリー点	300 °C
密度	5.0 g/cm ³
形状	φ14 × t 12

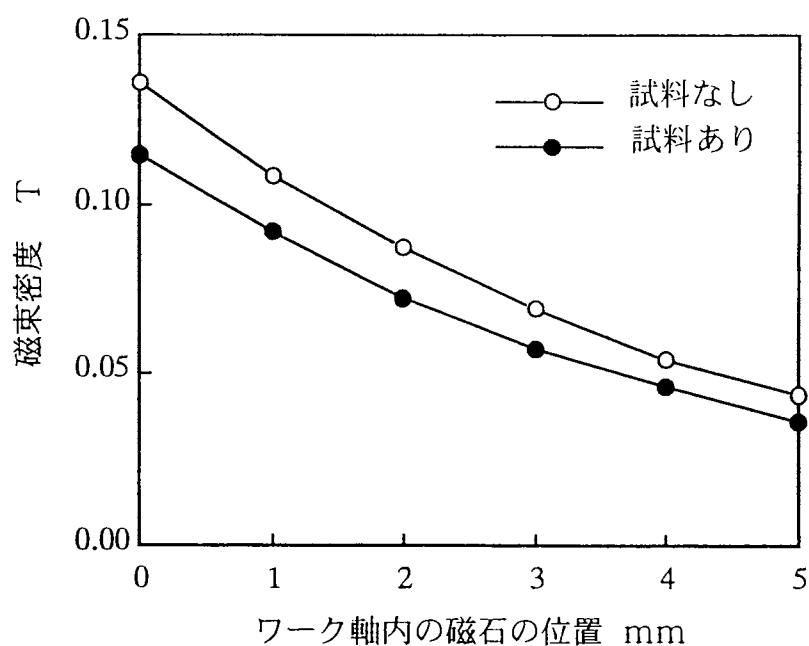


図 4.6 ワーク軸内の磁石の位置と磁束密度の関係

ワークホルダの概略図を図 4.7 に示す。ワークホルダは、非磁性体である黄銅で作製されている。それはワーク軸とネジで固定できる構造となっている。ワーク軸に内蔵されている永久磁石を、試料裏側に直接配置し得るようにするため、ワークホルダの中心部にはワーク軸と同径の穴があけてある。

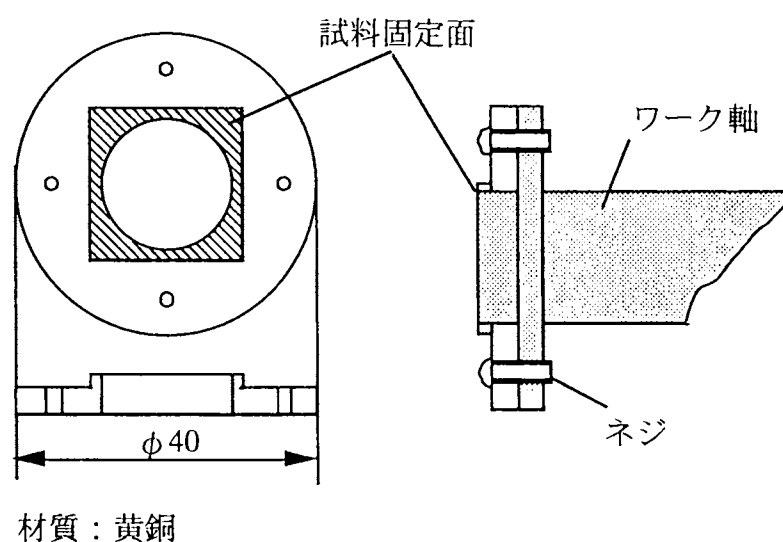


図 4.7 ワークホルダ概略図

図 4.1 に示すように、モータからの駆動力はタイミングベルトとプーリを介してワーク軸からワークホルダへと伝達される。ワークホルダは、スピードコントロー

ルモータ（ORIENTAL MOTOR 社製：DCサーボモータ）を使用して、0～234 [rpm] の範囲で時計回り方向（ポリシャ方向から見て）に回転させることができる。

ワーク軸は、精密型 X Y 軸ステージ（STM-40XY：シグマ光機）上に載置されている。ポリシャと加工物との間の隙間（以下クリアランスと略す）は、パルスコントローラから精密型 X Y 軸ステージの X 軸ステージを左右に動かす信号を送ることによって調整される。同様に、加工物上の研磨点の位置決めは、精密型 X Y 軸ステージの Y 軸ステージを移動することにより行われる。

実験の中では、ワーク軸を載置している Y 軸ステージに送りをかけながら研磨加工をし、面の創成を行っている。Y 軸方向の送りは、Y 軸ステージを駆動することにより行う。送りの距離や速度の設定は、パーソナルコンピュータ（PC-9801VM：NEC 社製）を用いて行った。Y 軸ステージの制御は、パーソナルコンピュータからの指令値を D/A 変換ボード（AB57-98B：ASTEK 社製）上で所定の電圧に変換し、2 軸パルスコントローラ（AS NET-3-2：シグマ光機）に入力することによって行った。

ワーク部を Y 方向に送る際、ワーク軸がわずかに傾いていても、クリアランスが変化するという問題が生じてくる。これを避けるために、ワーク軸を固定する軸受けは、回転可能な黄銅製の板上に固定している（図 4.1 参照）。この機構を採用することより、ワーク軸は回転軸を中心に回転可能になり、軸の傾きを調整することによってクリアランスを常に一定に保つことができる。

面研磨加工の際に、本機構を逆に利用することによって、意図的にクリアランス変化させることができる。

4.2.3 供試材について

実験に供した試料は、CZ 法（チョクラルスキー）で製造された単結晶シリコンウエハである。シリコン単結晶の方位は $\langle 111 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 、 $\langle 511 \rangle$ がある。本研究の場合 $\langle 100 \rangle$ 方位のウエハを使用した。シリコンウエハを試料として用いたのは、平坦度が非常に良好で、前加工を必要としないからである。シリコンウエハの仕様を表 4.3 に示す。

実験に際し、ポリシャと加工面との隙間（クリアランス）が非常に重要になるた

め、ウエハの取り付けは次のようにして行った。まず、ウエハの端面を軽くサンドペーパーでラップし、アセトン液中でそれを洗浄した。自然乾燥後、ウエハの表面に金を蒸着する。これは、クリアランスを設定する際の零点（ポリシャとウエハの接点）を導通させることで知るためである。蒸着後、ウエハを取り付け台にアロンアルファで貼布した。クリアランスは、テスターを用いてウエハとポリシャの接点を検出し、それから、ウエハとポリシャを所定の値だけ離すことにより設定した。

表 4.3 シリコンウエハ仕様

CZ-P型 <100>	
直径	150±0.5mm
厚さ	675±15 μm
抵抗率	11.5~15.5 Ω cm
ポリシ面 (表面)	Ra=0.001 μm Ry=0.006 μm
ラップ面 (裏面)	Ra=0.075 μm Ry=0.575 μm

4.2.4 磁性スラリーについて

加工液（磁性スラリー）は、磁性流体と砥粒を適量計量し、それを超音波洗浄機の容器の中にいれて、攪拌させて作成した。実験に用いる4種類の磁性流体を表 4.4 に示す。砥粒としては、アルミナ砥粒 (Al₂O₃) を用いた。アルミナは、密度4、モース硬度 9.0 である。実験には、3.0, 1.0, 0.3, 0.06 [μm] の各種の粒径の砥粒を使用した。なお、1回の実験に使用する加工液の量は5 [ml] である。

表 4.4 磁性流体の物性値 (タイホー工業株式会社)

	W-40	HC-50	PA-40	LS-40
比重 at 25℃	1.40±0.02	1.39±0.02	1.24±0.02	1.32±0.02
粘度 (mPa・s) at 25℃	25±7	22±5	190±50	450±150
飽和磁化 (T)	0.038	0.048	0.029	0.031
表面張力 (×10 ³ N/m)	28±2	26±2	—	—
溶媒	水	ケロシン	ポリアルファ オレフィン	アイコシル ナフタリン

4.2.5 実験手順

実験は次の手順に従って行った。以下にそのプロセスを簡単に示す。

(a) 供試材の固定

鏡面仕上げされたφ6インチシリコンウエハを、ガラスカッターを用いて20×20 [mm] の大きさに切断する。その後、切断した端面を軽くサンドペーパーでラッピングする。ラッピング後アセトン液中で洗浄する。表面に金を蒸着した後、接着剤（アロンアルファ）を用いてワークホルダに固定する（4.2.3節参照）。

(b) 内蔵磁石の位置設定

ポリシャ、ワーク軸内の磁石の位置を設定する。

(c) ワークステージの固定

ワークホルダをネジでワーク軸に固定する。

(d) クリアランスの調整

精密型X軸ステージに1パルス毎の送り（ジョグ送りという）をかけ、ポリシャに静かに接触させる。ポリシャにシリコンウエハが接触した瞬間、テスターの針が振れる。このときをもって接触したと判断した。この作業をシリコンウエハ表面の4点について行い、ポリシャに最も近い接触点を零点とする。最も近い点と遠い点との差が10 [μ m] 以下であった場合にのみ実験を行った。零点設定後、精密型X軸ステージを所定の距離だけ動かし、供試材とポリシャの間のクリアランスを設定した。

(e) 研磨半径の設定

研磨半径は、精密型Y軸ステージを動かすことにより決定する。研磨半径は、0～10 [mm] の範囲に設定することが可能である。

(f) 加工液の吸着

作製した加工液をポリシャにスポイトを用いて吸着させる。

(g) ポリシャおよびワーク軸の回転数を設定し、モータのスイッチをONにする。

(h) 加工時間の測定

所定の加工時間を設定し、実験を連続して行う。

4.3 評価方法

実験は同一条件で3回行った，実験終了後のシリコンウエハは，以下に記す各種測定器を用いて表面粗さや加工量，表面形状に特に注意を払った．

(1) 触針式粗さ計による測定

触針式粗さ計は，二次元表面形状測定器（フォームタリサーフ）と万能表面粗さ形状測定器（タリサーフ6）の2機種を用いた．フォームタリサーフでは表面形状をタリサーフ6では表面粗さを測定した．フォームタリサーフ，タリサーフ6の仕様を表4.5に示す．フォームタリサーフでは，図4.8に示すように4箇所について測定を行い，それぞれを平均し，加工量である研磨溝深さとした．タリサーフ6では，加工後に形成された溝あるいは面に関して，スタイラスを走査させることにより，中心線表面粗さRaと最大粗さRyの値を求めた．このRaとRyの値から，研磨後のシリコンウエハの表面粗さを評価した．

表 4.5 触針式粗さ計の仕様

	フォームタリサーフ	タリサーフ 6
[標準ピックアップ] 検出方法 スタイラス スタイラス圧 測定範囲	レーザ干渉計 ダイヤモンド $2\mu\text{mR}$ 100mgf 4mm、8mm	差動トランス ダイヤモンド $2\mu\text{m}$ （角錐） 100mgf $127\mu\text{m}$
[駆動部] 最大駆動距離 真直度精度 レベリング調整範囲	120mm $0.5\mu\text{m}/120\text{mm}$ 以内 不要	120mm $0.5\mu\text{m}/120\text{mm}$ 以内 $\pm 10^\circ$

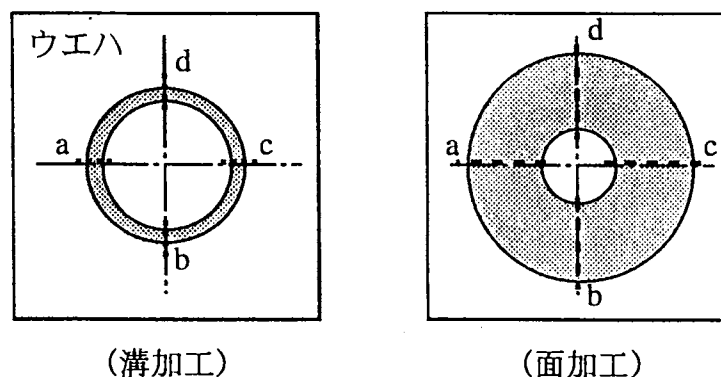


図 4.8 測定箇所

(2) 光学顕微鏡による評価

研磨後のシリコンウエハの表面状態がどのような様子であるか知るために、倍率50～1000 倍の倍率の光学顕微鏡（AFX-DX：ニコン社製）を用いて写真観察した。

(3) SEM（Scanning Electron Microscope）による評価

走査型電子顕微鏡（SEM）観察から、加工痕の入り方やウエハの削り取られ方、砥粒の運動状態について検討した。

(4) AFM（Atomic Force Microscope）による評価

シリコンウエハ表面の加工痕の入り方、破壊モードを3次元的に調べるために、AFM 観察した。光学顕微鏡は、垂直分解能は高いが面分解能が極めて低く、一方、走査型電子顕微鏡（SEM）は面分解能は高いが垂直分解能がかなり低いという特徴を持っている。これらに対し、原子間力顕微鏡（AFM）は垂直分解能が0.1nm、面分解能は1nmが得られる原子スケールの新しい表面観察装置である。AFMは鋭く尖らせた探針を取り付けたカンチレバーを試料表面に近づけ、探針の先端と試料表面の原子間に働く微小な斥力により生じるカンチレバーのたわみや反りを検出し表面形状を観察する。AFM による観察はシリコンウエハと同条件で研磨したスライドガラスについて行い、シリコンの加工状態を推察するということにした。これはシリコンの場合、表面吸着層などの影響によりAFM 観察ができないという理由があるためである。AFM スキャナヘッドの仕様を表 4.6 に示す。

表 4.6 AFMスキャナヘッドの仕様

形式	AS-8.0
機械分解能 水平・垂直(nm)	0.1
水平走査範囲 下限(nm) 上限(nm)	2 12
垂直追尾範囲 (nm)	4.4

(5) ESCA（Electron Spectroscopy for Chemical Analysis）による表面分析

研磨は、加工工具である砥粒にある手段で力を与え、それを加工物表面に作用させることによって加工を行う。その加工形態は衝突による微小な破壊であるが、それが微小であるが故に砥粒を構成する分子が試料表面の原子間に入り込むという現象が起こる。実際これは、高精度な屈折率を必要とする光学レンズをポリッシングによって仕上げる点で問題になっている。よって、本実験装置によって研磨された試料の表面性状がどのようなものであるかを調べるため、ESCA を用いた表面分析を行った。

ESCAによる表面分析の原理は次ぎのようなものである。一定のエネルギーをもつX線を固体表面に照射したとき、その表面から光電子が放出する。放出された光電子は、固体表面の原子や結合状態により固有のエネルギーをもつため、その光電子の数をエネルギー別にカウントすることによって、固体表面にある原子の種類や結合状態がわかるというものである。

表面分析では、研磨加工したシリコンウエハの表面にケイ素以外にどのような元素が存在するかをまず一通り調べた後、確認された元素を細かく調べた。また、検出されたスペクトルの面積比より、ケイ素以外の不純物がどれくらいあるかをケイ素の数との比で表した。これは、ESCAでは元素の絶対量というものを測定できないためである。

第5章 平形ポリシャ方式研磨装置における実験結果

5.1 はじめに

磁性スラリーを用いてシリコンウエハを研磨するのに、平形ポリシャ方式の研磨装置を用いて行った。実験は、ワークに送りをかけず定位置を研磨する溝研磨加工と、ワークに送りをかけて面創成を行う面研磨加工について行った。溝研磨加工と面研磨加工の様子を図 5.1 に模式的に示す。

本章に記す溝研磨加工では、研磨特性に影響を及ぼすと思われる各種の因子について検討を行った。特に、加工量や表面粗さがどのように変化するか調べた。本研磨法の基本特性を把握する目的から、実験は主として、シリコンウエハのポリシ面 ($Ra=0.001$ [μm]) について行った。一方、面研磨加工の場合においては、ポリシ面のみならずラッピング面 ($Ra=0.075$ [μm]) についても研磨実験を行った。これは、本研磨法が超精密加工への展開も秘めているかどうか知るためである。

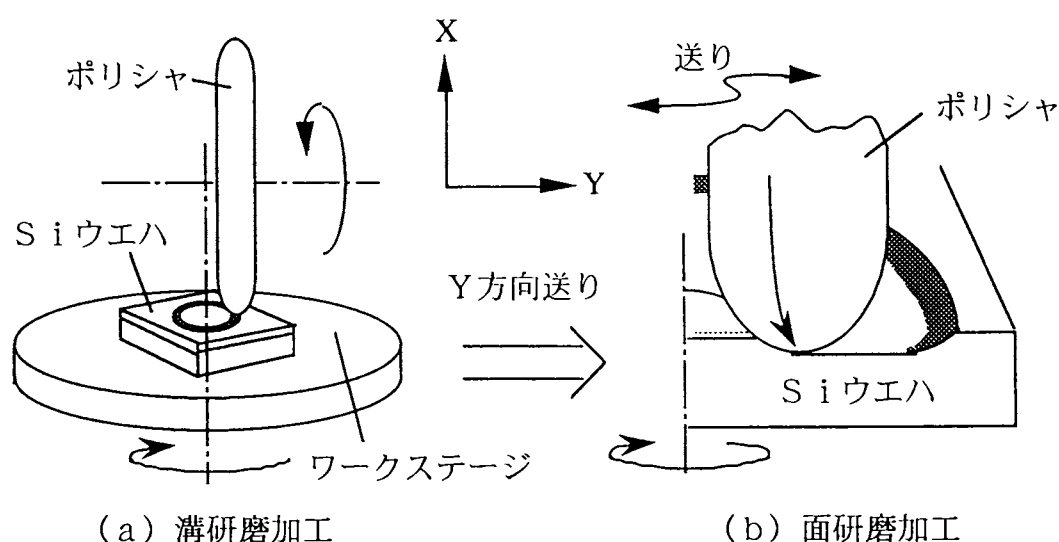


図 5.1 溝研磨加工と面研磨加工

実験条件を表 5.1 に示す。

表 5.1 実験条件

加工試料	シリコンウエハ 20mm×20mm×0.6mm フロートガラス 20mm×20mm×1.3mm
砥粒	Al ₂ O ₃ 0.06, 0.3, 1.0, 3.0 μ m
磁性流体	W-40 (水ベース) HC-50 (ケロシンベース) PA-40 (ポリアルファオレフィンベース) LS-40 (アイコシルナフタリンベース)
加工時間	10 ~ 60 min
ポリシャ回転数	55 ~ 160 rpm
ワーク軸回転数	70 rpm
ポリシャ内磁石位置	-3 ~ +3 mm
ワーク軸内磁石位置	0 ~ 5, ∞ mm
研磨半径	1.25 ~ 5.00 mm
クリアランス	10 ~ 40 μ m
Y 軸送り距離	4 mm
Y 軸送り速度	5 μ m/s

第 4 章で記したように、実験装置は永久磁石をワーク軸内とポリシャ内に配置している。そのセッティング状態を図 5.2 に示す。ワーク軸内磁石位置は、磁石が加工試料裏面に接触しているときを 0mm とした。一方、ポリシャに内蔵した磁石の位置の場合には、磁石の厚みの中心がポリシャ外周の曲率の先端と一致するときを 0mm とし、その位置から回転軸側に動かした場合を負、その反対に動かした場合を正と定義している。また、それぞれの磁石の極配置は図 5.2 のようになっている。

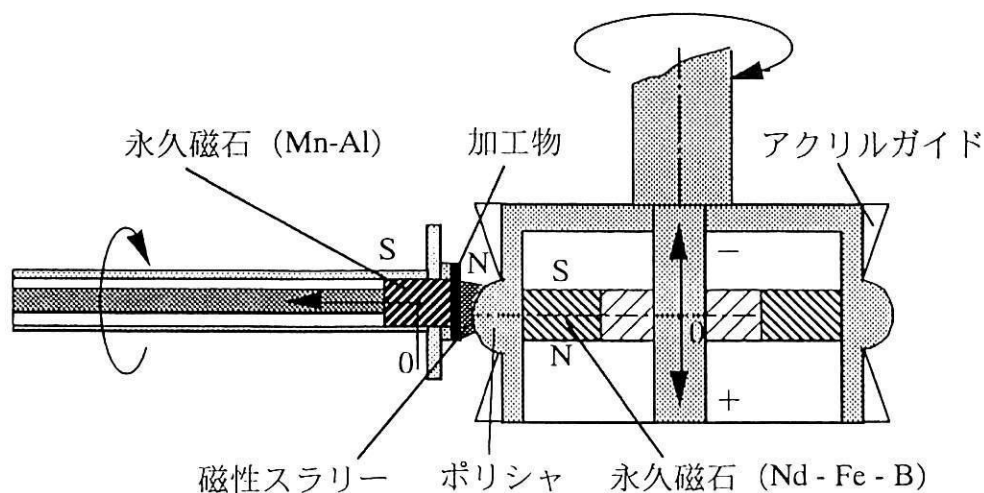


図 5.2 加工部分の概略図

5.2 溝研磨加工に関する実験結果と考察

5.2.1 加工時間の影響

研磨が加工時間の経過とともにどのように変化するかをまず始めに調べた。加工状態は、研磨後の溝研磨痕の表面形状と表面粗さを測定し、評価を行った。表面形状からは研磨溝深さを求めた。加工時間と研磨溝深さの関係を図 5.3 に示す。実験は、水ベース (W-40) とケロシンベース (HC-50) の2種類の磁性流体を用いて行った。砥粒はアルミナ砥粒 (粒径 $1\mu\text{m}$; 1vol%) を使用し、クリアランスを $10\mu\text{m}$ 、研磨半径を 2.5mm 、ポリシャ回転数を 160rpm 、ワーク軸回転数を 70rpm に設定して実験を行った。その際、ワーク軸内の磁石は試料裏面より 2mm の位置に、ポリシャ内の磁石は 0mm の位置においた。なお、以後の実験は特に断らない限り同一の実験条件の下で行った。

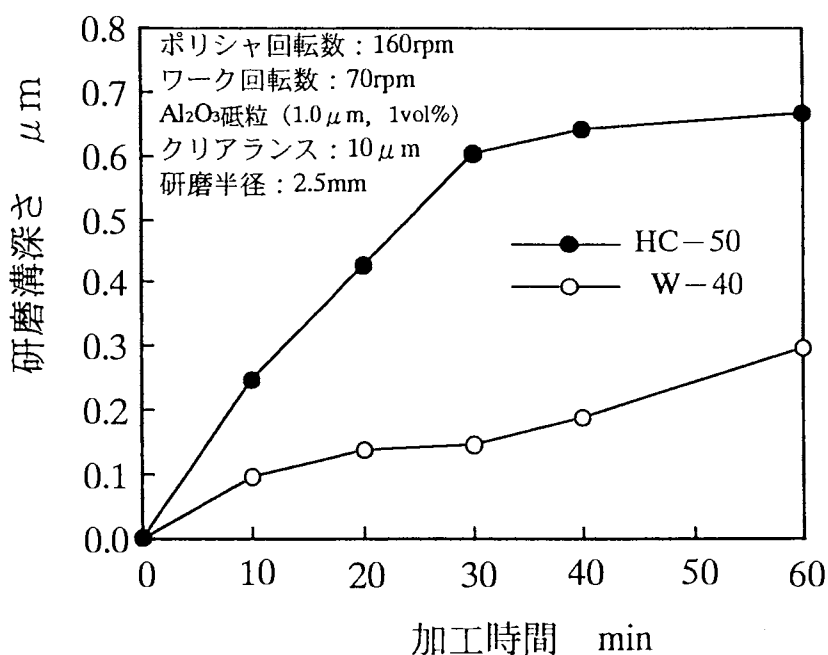


図 5.3 加工時間と研磨溝深さの関係

図 5.3 から、加工時間が増すにつれていずれの磁性流体の場合も研磨溝深さが次第に増加することがわかる。しかし、ケロシンベースの場合は特に増加の度合いが著しい。また、加工量の絶対値もケロシンベースの方が極めて大きい。このように、ケロシンベースの磁性流体の場合に研磨溝深さが大きくなったのは、次の理由によ

るものと思われる。3.3節で検討した論考結果から推察すると、ケロシンベース磁性流体のほうがワーク軸内の磁石から大きな磁気力をうけ、そのため研磨量も少なくなるものと推論される。しかし、実験結果は逆の傾向を示している。これは、ケロシンベース磁性流体は水ベース磁性流体よりも粘度が小さく、このため流体内で砥粒が動き易いことが原因していると思われる。すなわち、研磨点に到着（衝突）する砥粒が多くなると予想される。換言すれば、粘度が小さいケロシンベース磁性流体の方が、懸濁している砥粒の流体から受ける流動力も大きくなると思われる。これらのことが原因して、ケロシンベースの場合の研磨作用は、水ベースの磁性流体よりもスムーズに営まれたものと思われる。このため加工量も増加したものと考えられる。ケロシンベースの磁性流体の場合、加工時間が30分経過後ほぼ一定の値になるのは、研磨作用が進行するにつれて、砥粒が次第に破碎し、研磨を営む能力が徐々に失われていったためではないかと考えられる。

図 5.4 に加工時間と表面粗さの関係を示す。図 5.4 から、ケロシンベースの磁性流体の場合には、幾分ではあるが表面粗さの値が水ベースのものに比較して大きいといえる。これは、先にも述べたように、ケロシンベースの磁性流体のほうが流体から受ける力が大きいためではないかと考えられる。しかしながら、両磁性流体とも、加工時間と表面粗さの間にはさしたる関係はないようである。Ra の値で $5\ \mu\text{m}$ 、Ry の値で $30\ \mu\text{m}$ とほぼ一定の値を示す。

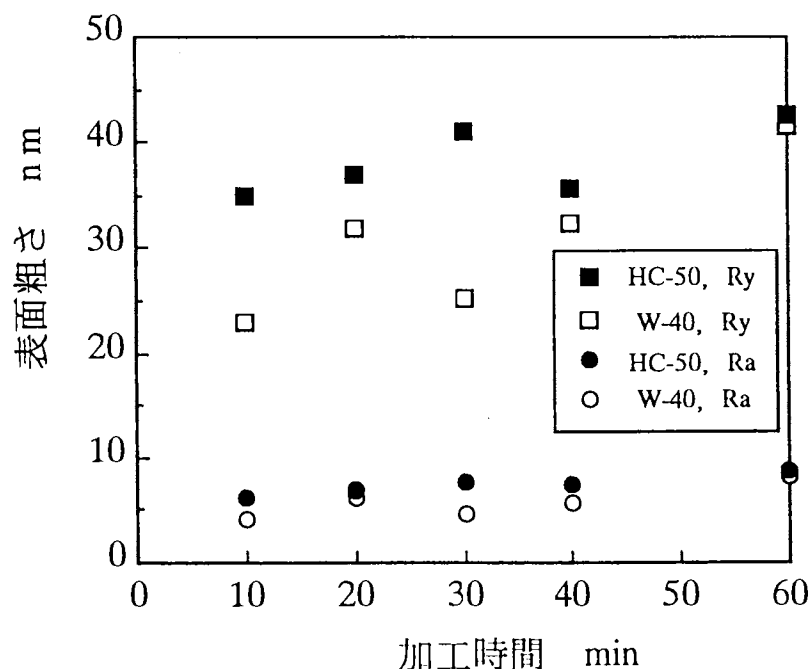
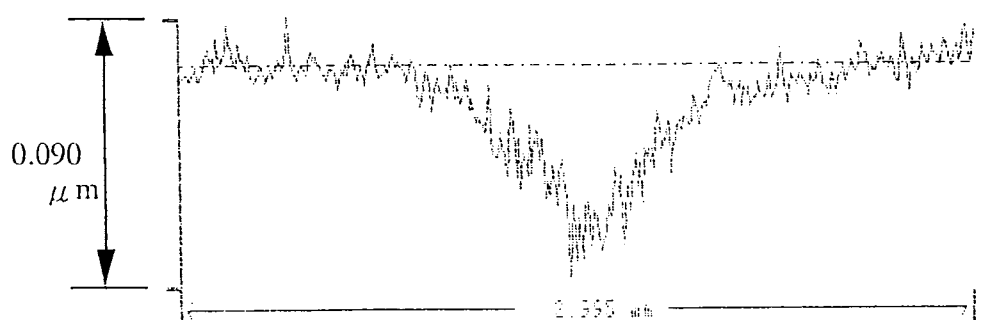
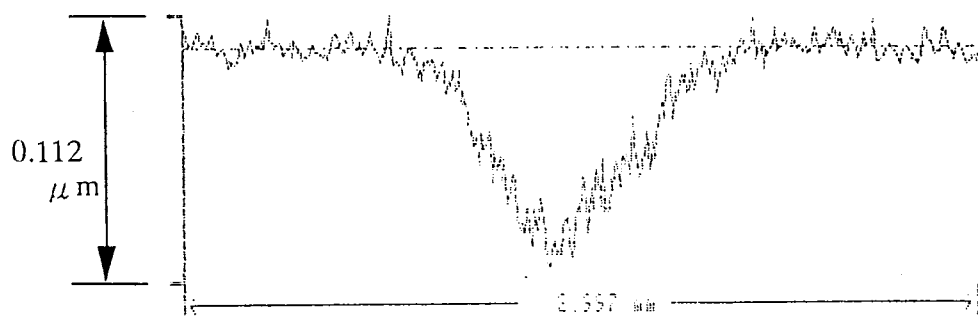


図 5.4 加工時間と表面粗さの関係

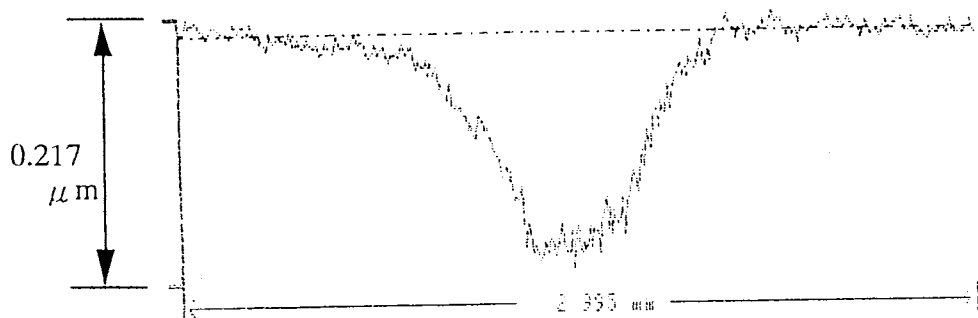
図 5.5 に、水ベース磁性流体を用いて、加工時間を 10、30、60 分として研磨後に形成される溝の断面形状を測定した結果を示す。図 5.5 から、下に凸のほぼ左右対称な断面形状となっていることがわかる。図 5.5 に示す断面形状から見て、加工が最も速く進行するのは溝中央である。また、この近傍が他の場所に比して幾分粗くなっている様子がわかる。このことは、断面形状がポリシャの形状に強く依存するということを意味している。すなわち、ポリシャの外周面が軸方向に曲率を持っており、クリアランスの小さい中央部ほど砥粒の流速が速く、加工作用が速く進行したものと考えられる。さらに、中央付近では砥粒の加工面に垂直な方向の運動エネルギーも大きくなるため、粗さが一層大きくなったものと思われる。



加工時間 10分



加工時間 30分



加工時間 60分

図 5.5 研磨面の断面形状（加工時間）

加工時間を10分、30分、60分として研磨実験を行ったときの、研磨溝の光学顕微鏡写真を図5.6に示す。(a)～(c)は水ベース磁性流体を用いた場合の研磨溝で、(d)～(f)はケロシンベース磁性流体を用いたときの写真である。

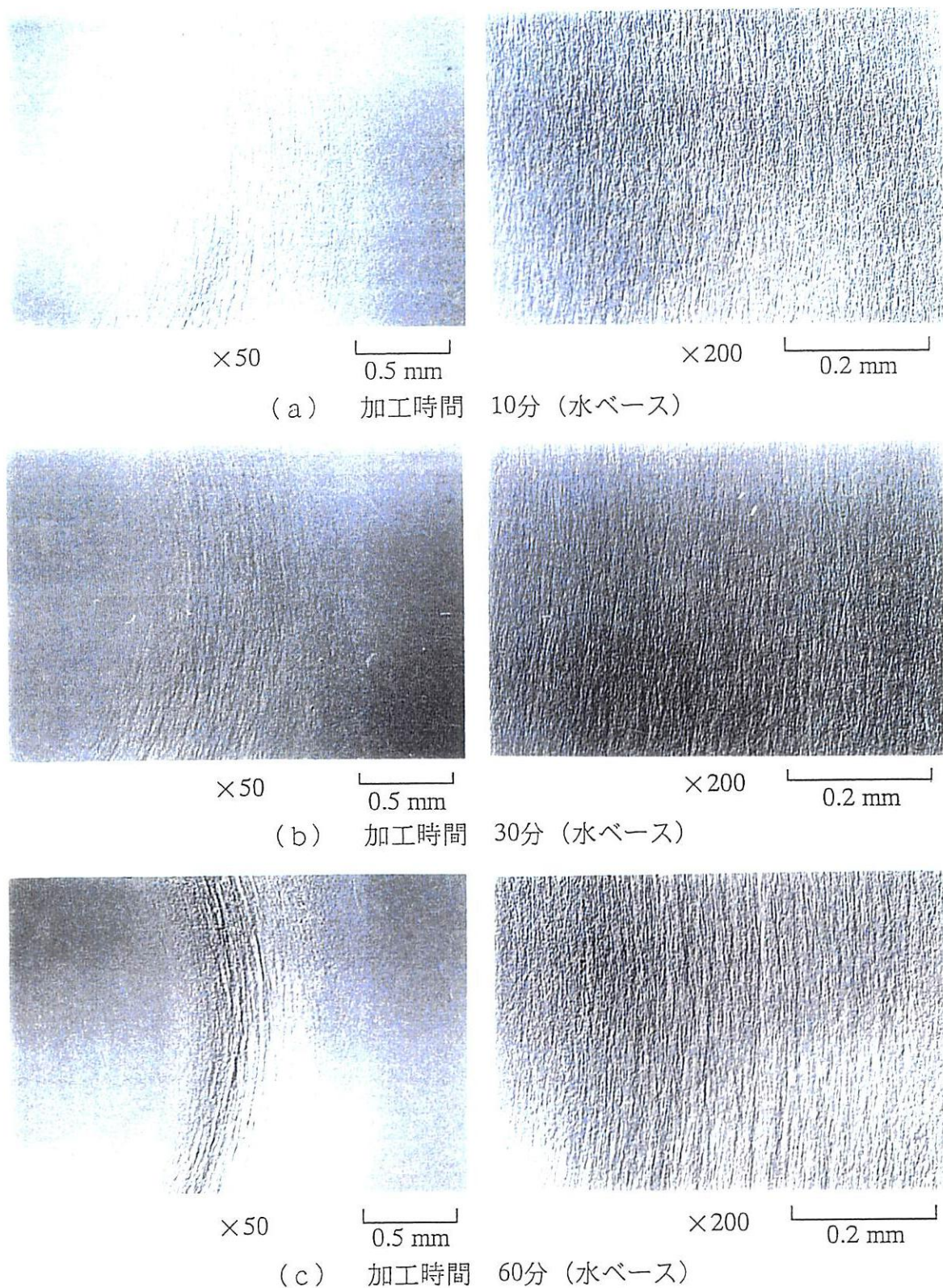
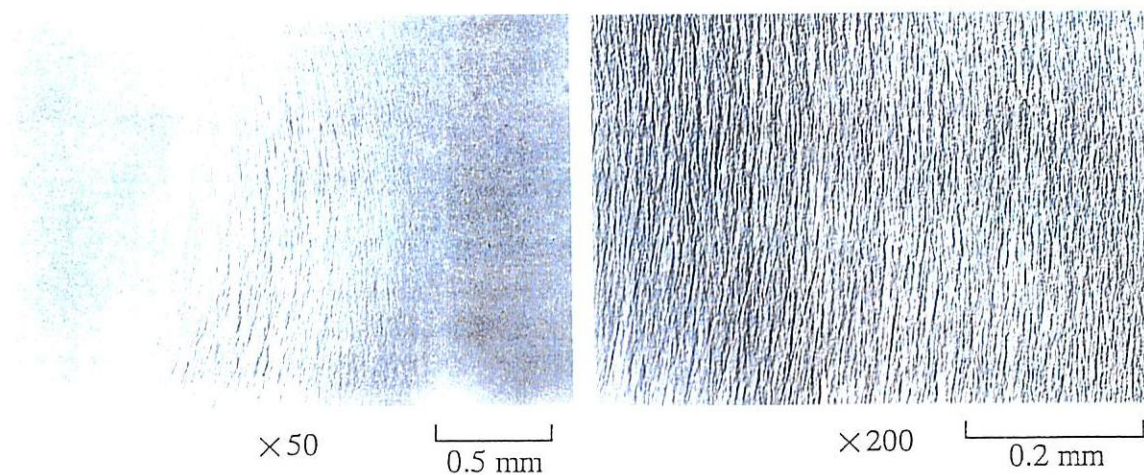
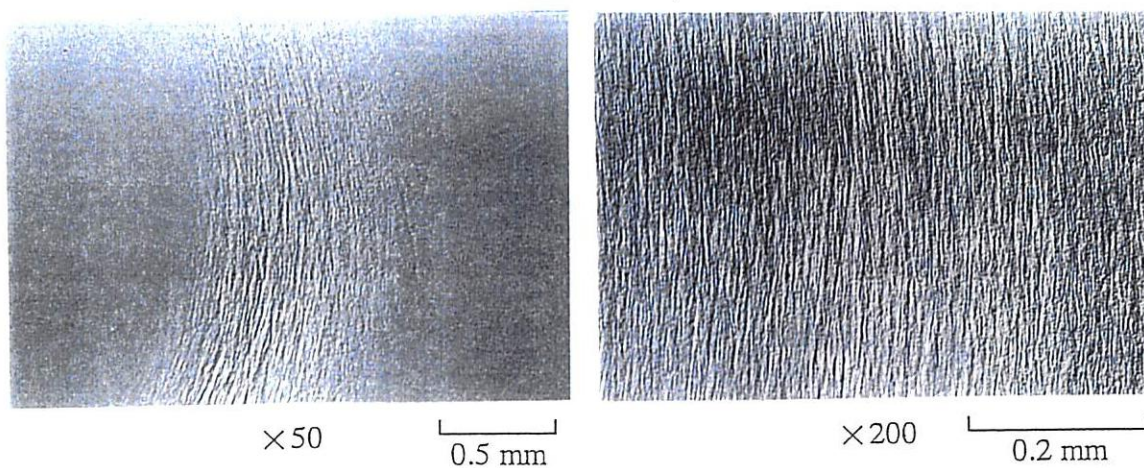


図5.6 加工面の観察写真 (加工時間)

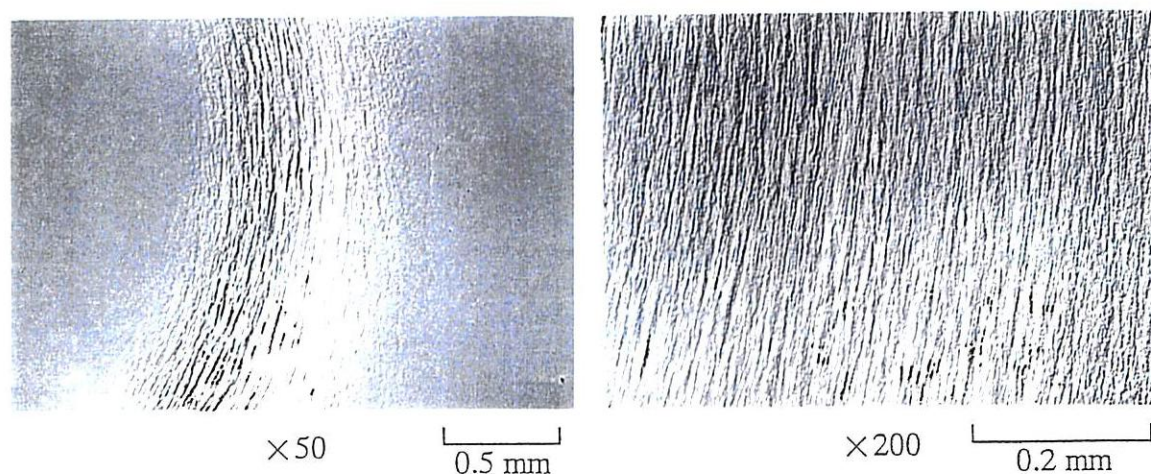
一連の写真を通観すると、研磨痕の創成は、ワーク軸の回転と研磨半径から決まる円の接線方向に一直線に伸びた微小な加工痕の集合体で形成されていることがうかがえる。水ベース、ケロシンベースの磁性流体とも、加工時間が大きくなるにつ



(d) 加工時間 10分 (ケロシンベース)



(e) 加工時間 30分 (ケロシンベース)



(f) 加工時間 60分 (ケロシンベース)

図 5.6 加工面の観察写真 (加工時間)

れて研磨溝の輪郭が明瞭なものとなってくる。また、図 5.4 の加工時間と研磨溝深さのグラフからわかるように、全体的に見て、ケロシンベースの磁性流体の場合には加工痕が明瞭であるといえる。加工が能率良く行われた様子がうかがえる。観察の倍率を大きくして見ると、無数の加工痕が同心円上に広く分布しているのがわかる。加工痕の大きさは大小入り交じったものから形成されている。これは、砥粒の粒度のばらつき状態（分布状態）や、砥粒の凝集等が影響しているものと考えられる。一般に、加工時間が長くなるにつれて、その加工痕中に長周期の成分を有するうねりが交じるようになる。

5.2.2 ポリシャの回転数の影響

図 5.7 に、ポリシャの回転速度と研磨溝深さの関係を示す。実験は、研磨時間を 30 分、ワーク回転軸の回転数を 70 rpm として行った。図 5.7 から、水ベース、ケロシンベースの磁性流体の場合とも、回転数に比例して研磨溝深さが増加する様子がわかる。しかし、ケロシンベース磁性流体の場合には増加の割合が大きい。これは、砥粒がケロシンベースの磁性流体中で運動し易いことが、すなわち、加工物表面での砥粒の運動が活発であることが影響していると思われる。

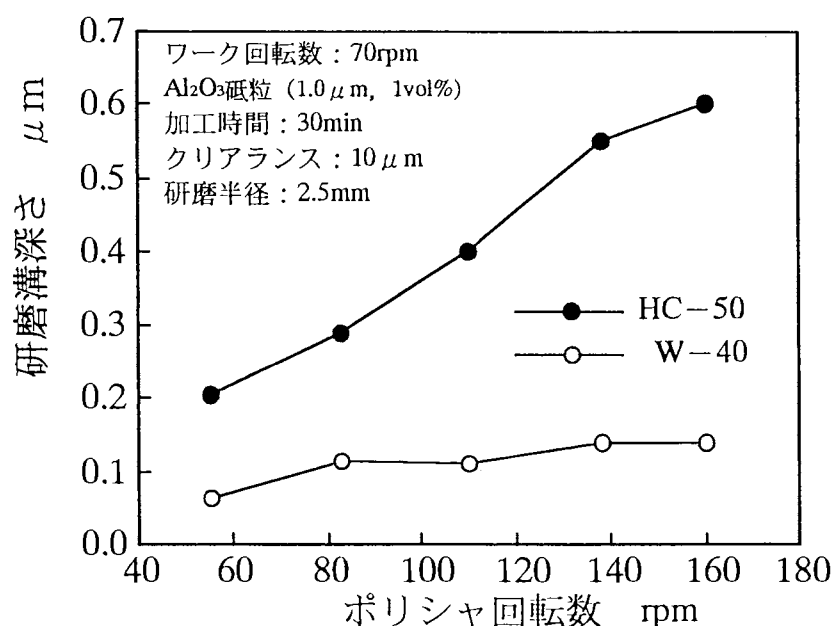


図 5.7 ポリシャ回転数と研磨溝深さの関係

5.2.3 クリアランスの影響

ポリシャは曲率を持っているため、クリアランスは曲率の頂点で一番狭く、そして、その頂点から離れるにつれて次第に大きくなる。このため、加工様態も変わることが予想される。実際、5.2.1項の写真を見ると、ひとつの研磨溝のなかに異なった研磨様態が観察された。そこで、ポリシャと加工物の間のクリアランスが、研磨面の創成にどのような影響を及ぼすのかを調べてみた。実験は、クリアランスを10, 15, 20, 30, 40 μm と5通りに変化させて行った。その際、水ベースとケロシンベースの2種類使用した。砥粒は、アルミナ砥粒（粒径1 μm ; 1vol%）を使用し、加工時間を30分とした。

クリアランスと研磨溝深さの関係を図5.8に示す。図5.9に、水ベース磁性流体を用い、クリアランスを10, 20, 40 μm として実験を行ったときの断面形状を示す。図5.8から、ケロシンベースの磁性流体の場合、クリアランスが大きくなるにつれて研磨溝深さが急激に減少することがわかる。しかし、クリアランスが20 μm を過ぎるあたりから減少の度合は緩やかになる。一方、水ベースの磁性流体の場合には、クリアランスの増加とともに徐々に研磨溝深さが低減していく。クリアランスが20 μm を過ぎるあたりで、水ベースとケロシンベースの磁性流体による研磨溝深さの値はほぼ同じになる。

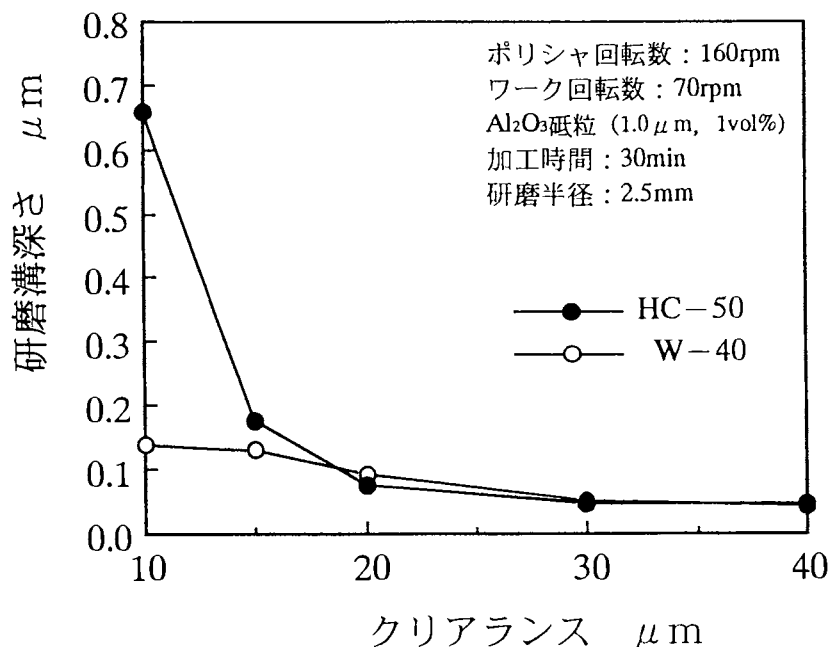
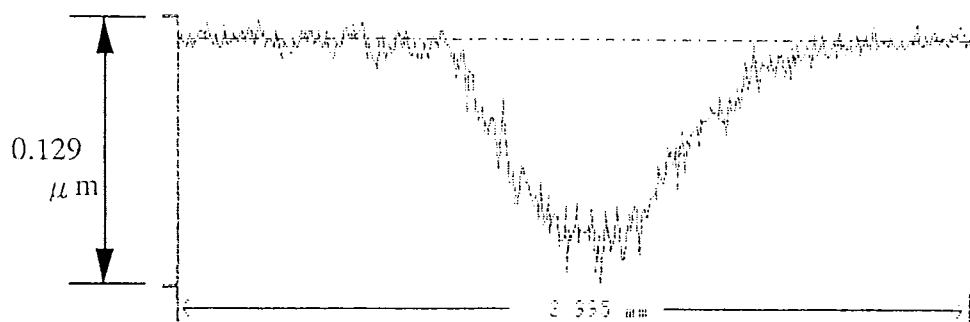
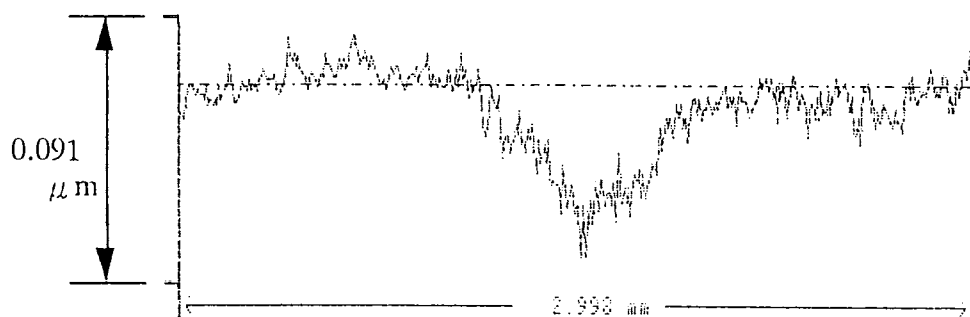


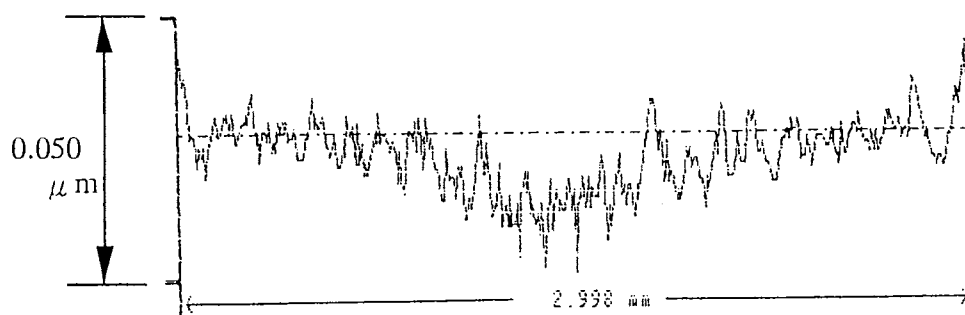
図 5.8 クリアランスと研磨溝深さの関係



クリアランス 10 μm



クリアランス 20 μm



クリアランス 40 μm

図 5.9 研磨面の断面形状（クリアランス）

図 5.8 に示すように、クリアランスが増すと研磨溝深さが減少するのは次の理由によるものと思われる。原因の一つとして、流体力学的な要因が挙げられる。3.3 節で述べたように、被加工物表面に作用する砥粒の運動エネルギーは、流体の流速に強く依存する。流体の流速は、ポリシャ周速度とクリアランスによって決まるので、クリアランスの増加は、被加工面上での砥粒の速度を小さくする。研磨溝深さが減少したのはこのことが原因しているものと思われる。一方、流体の流速が小さくなると、相対的に磁気の影響が強く表れるようになる。磁性流体の流速が小さくなると、ケロシンベース磁性流体の場合には、液に懸濁しているなかの砥粒がポリシャ

方向に移動し易くなる. このため, ケロシンベースの磁性流体を使用した場合には, 研磨溝深さの値がクリアランスが増すにつれて大きく低減したと思われる.

図 5.10 に, クリアランスと表面粗さの関係を示す. 図 5.10 から, 表面粗さの値はクリアランスが大きくなるにつれて次第に小さくなる様子がわかる. 水ベース, ケロシンベースの両磁性流体の場合とも, 同じ傾向を示す. また, 表面粗さの絶対値は, 両磁性流体ではほぼ同じ値である. 図 5.10 において, クリアランスが小さい場合, 表面粗さが多少大きくなっている. しかし, 概略 $Ra=5\text{nm}$ 前後, $Ry=20\text{nm}$ 前後である. ケロシンベースの磁性流体を用い, クリアランスが $10\text{ }\mu\text{m}$ の場合は, Ry が 40nm と大きな値となっている. これは, 研磨面に生じたうねりのためと考えられる. うねりを発生させずに加工を行うことができれば, 非常に高精度な研磨が行えるものと期待できる.

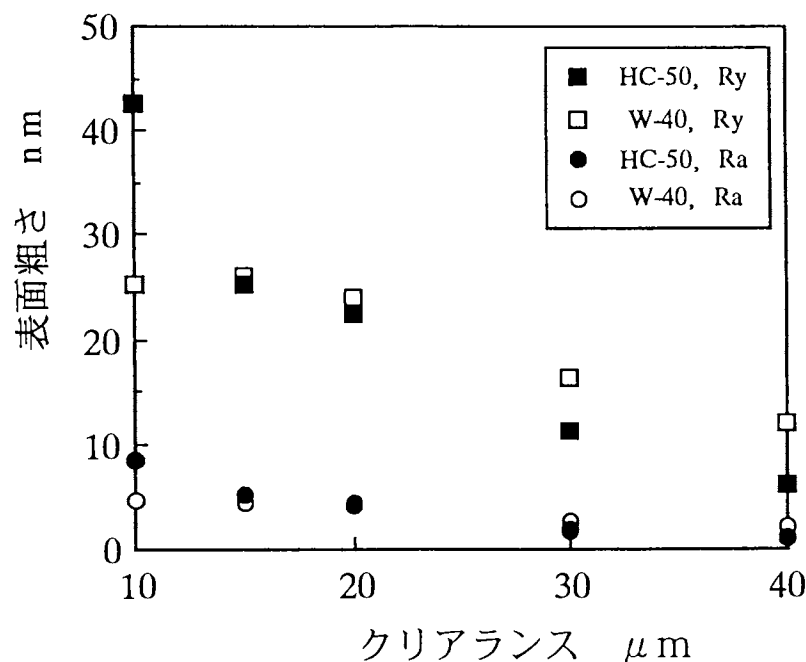
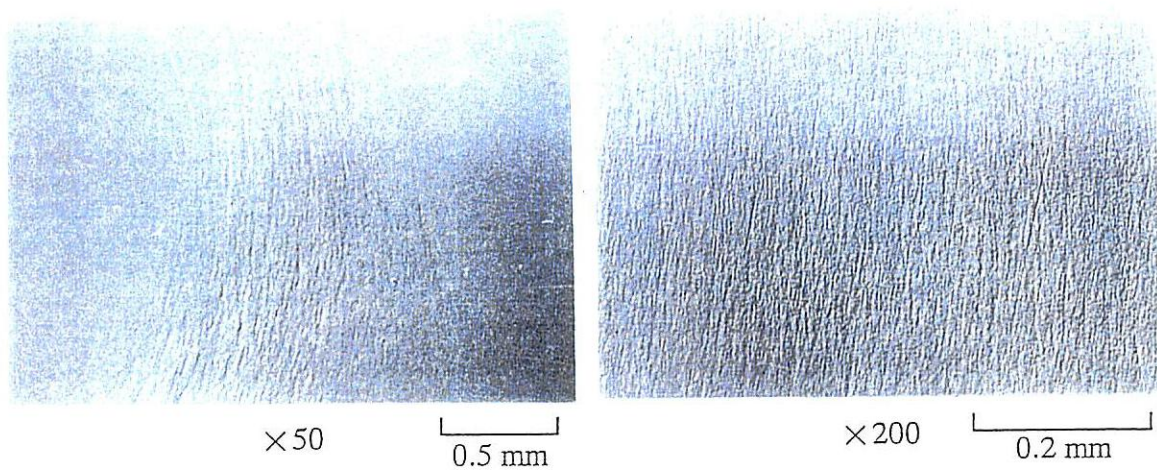


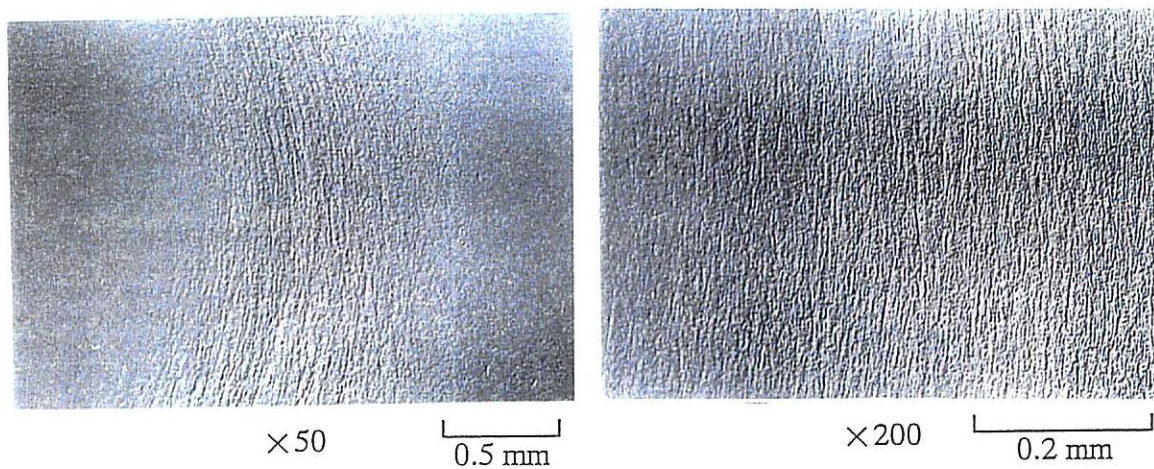
図 5.10 クリアランスと表面粗さの関係

クリアランスを $10\text{ }\mu\text{m}$, $20\text{ }\mu\text{m}$, $40\text{ }\mu\text{m}$ と変えて研磨実験を行ったときの研磨溝の光学顕微鏡写真を図 5.11 に示す. (a) ~ (c) は水ベースの磁性流体を用いた場合の研磨溝で, (d) ~ (f) はケロシンベースの磁性流体を用いた場合の写真である. 研磨痕の状態は, 加工時間の場合に見られる研磨痕とほぼ同じである. 全体的に見て, クリアランスが大きくなるにつれて研磨溝の深さが浅くなっているといえる. なかでも, ケロシンベース磁性流体を用いたものは, $20\text{ }\mu\text{m}$ になると水

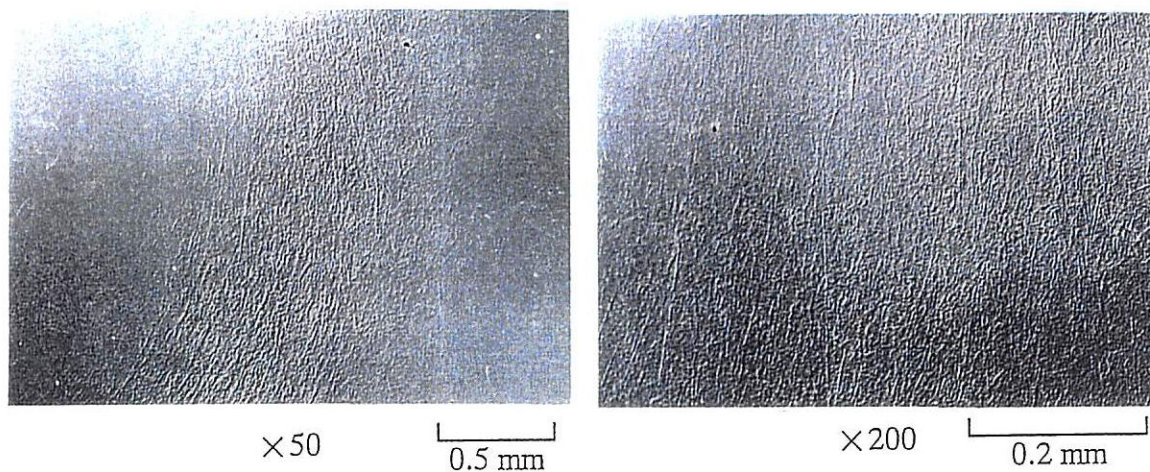
ベース磁性流体を用いたものより加工が行われていない. 特にクリアランスが $40\mu\text{m}$ のもの, ごくわずかな加工痕が見えるだけである.



(a) クリアランス $10\mu\text{m}$ (水ベース)

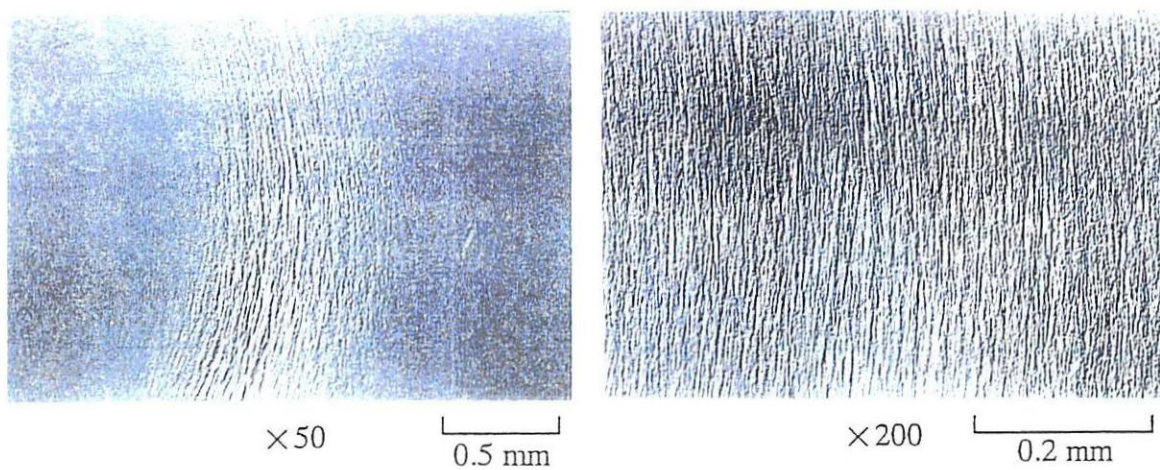


(b) クリアランス $20\mu\text{m}$ (水ベース)

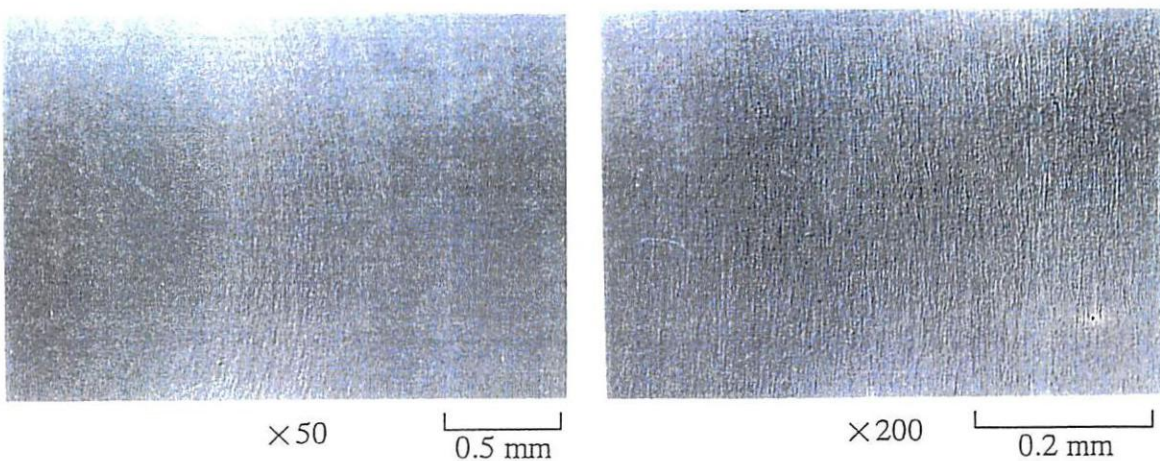


(c) クリアランス $40\mu\text{m}$ (水ベース)

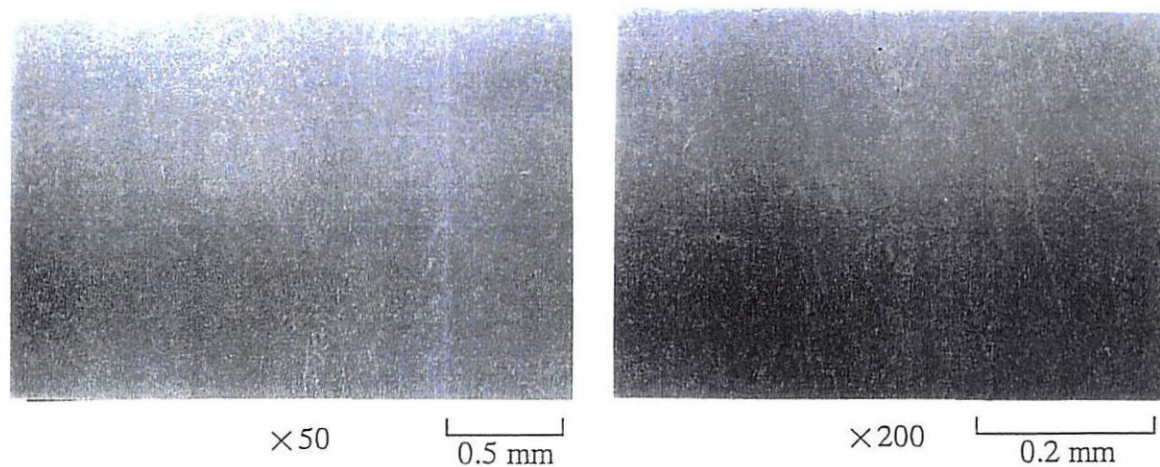
図 5.11 加工面の観察写真 (クリアランス)



(d) クリアランス 10 μ m (ケロシンベース)



(e) クリアランス 20 μ m (ケロシンベース)



(f) クリアランス 40 μ m (ケロシンベース)

図 5.11 加工面の観察写真 (クリアランス)

5.2.4 砥粒径の影響

次に、砥粒の粒径が加工にどのような影響を及ぼすかについて実験的検討を行った。実験は、水ベースとケロシンベースの2種類の磁性流体を用いて行った。使用した砥粒はアルミナ砥粒で、粒径は0.06, 0.3, 1.0, 3.0 μm である。砥粒濃度は1.0vol%とした。

図5.12に、タリサーフ6で測定した表面粗さのプロフィールを示す。図5.13に、図5.12に示す値を数量化したグラフを示す。

図5.12及び図5.13から、砥粒径が増すにつれて表面粗さが次第に増加する様子がわかる。特に、粒径3.0 μm を用いた場合には、表面粗さの値が非常に大きくなることわかる。しかしながら、ケロシンベースと水ベースの磁性流体間では、そ

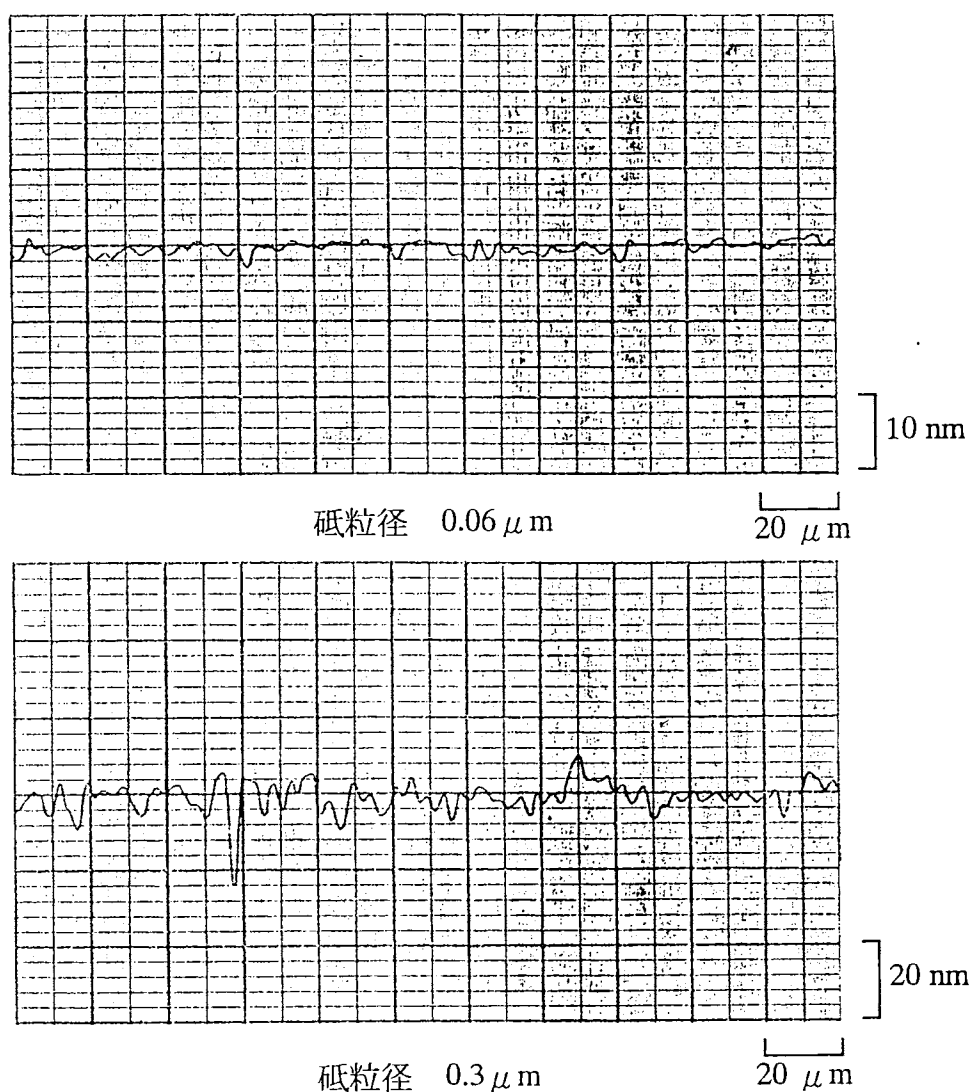


図5.12 表面粗さの形状プロフィール

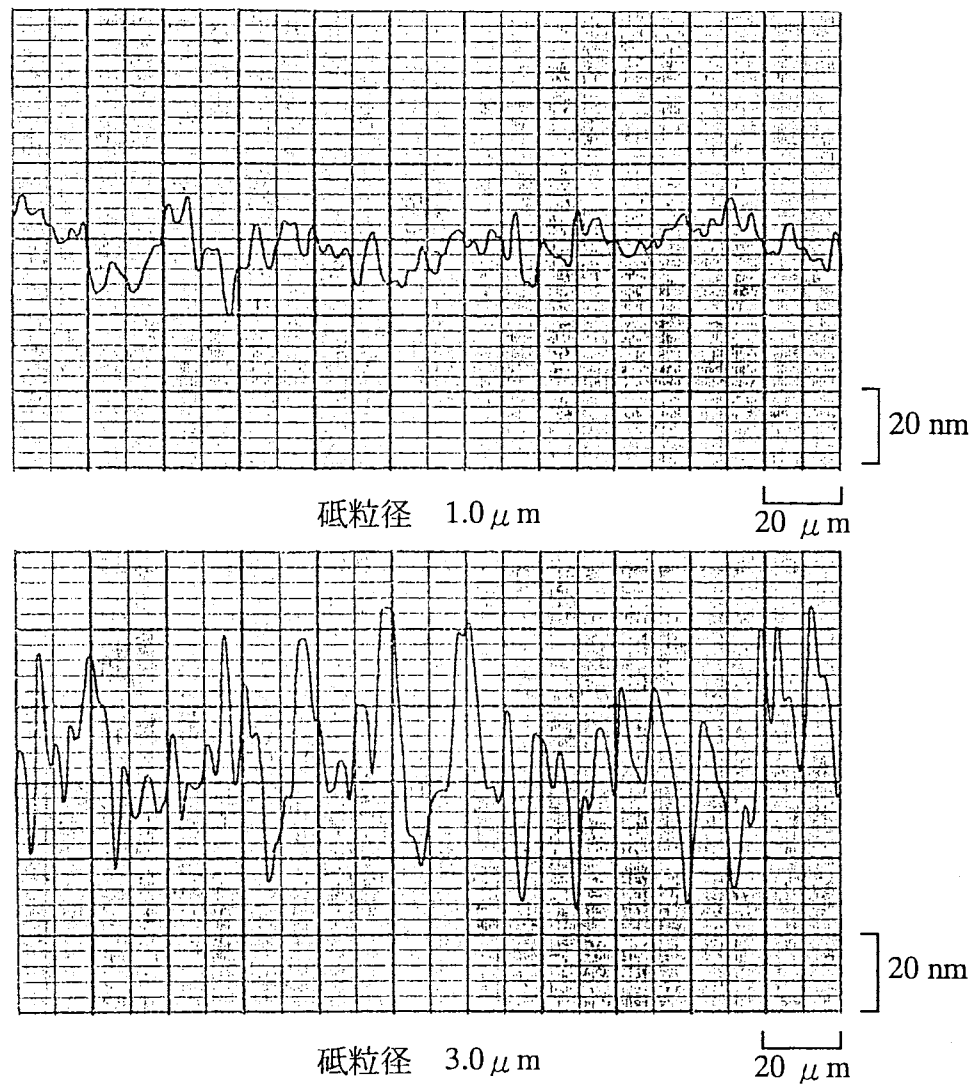


図 5.12 表面粗さの形状プロフィール

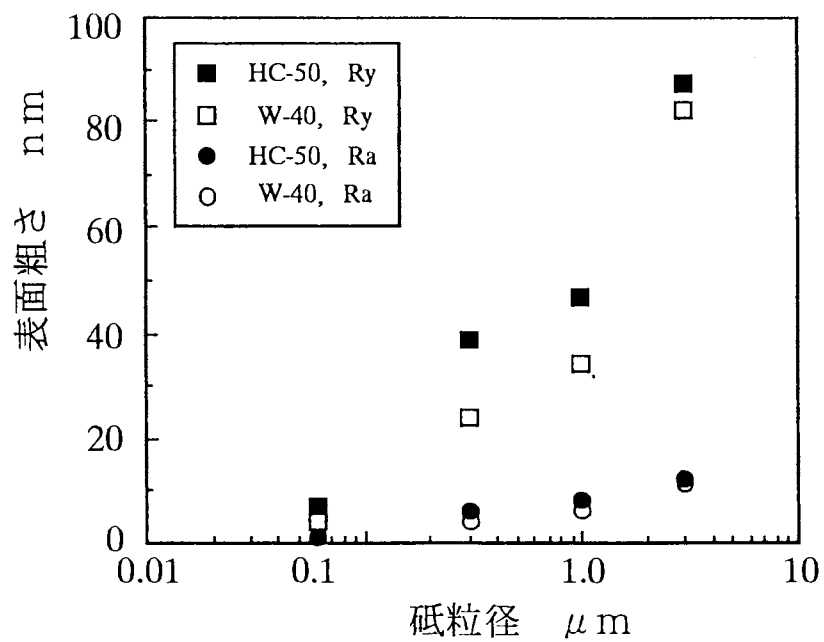


図 5.13 砥粒径と表面粗さの関係

の表面粗さに大きな差は認められない。これは、砥粒が同一の大きさであると、溶媒の磁性流体がどのような種類であっても研磨を営む砥粒の作用領域は同じであり、ただ、砥粒を保持する状態が流体によって違うだけであるためと考えられる。表面粗さに大きな違いが見られなかったのはこのことが原因していると思われる。以上の測定結果から、表面粗さは砥粒径に依存するといえる。

図 5.14 に、水ベース磁性流体を使用して実験を行ったときの加工面の観察写真を示す。図 5.14 から、砥粒径が小さくなるにつれて、研磨痕内に存在する加工痕の大きさが次第に小さくなっていく様子がわかる。すなわち、加工面が良好なものになっていく。倍率を高くして観察した結果も図 5.14 に併記しているが、砥粒径が $3.0\ \mu\text{m}$ の実験結果に注目すると、研磨痕は、筋状の加工痕の集合体から形成されているが、その加工痕の中に微小なピット状の痕跡が点在している様子がわかる。これ

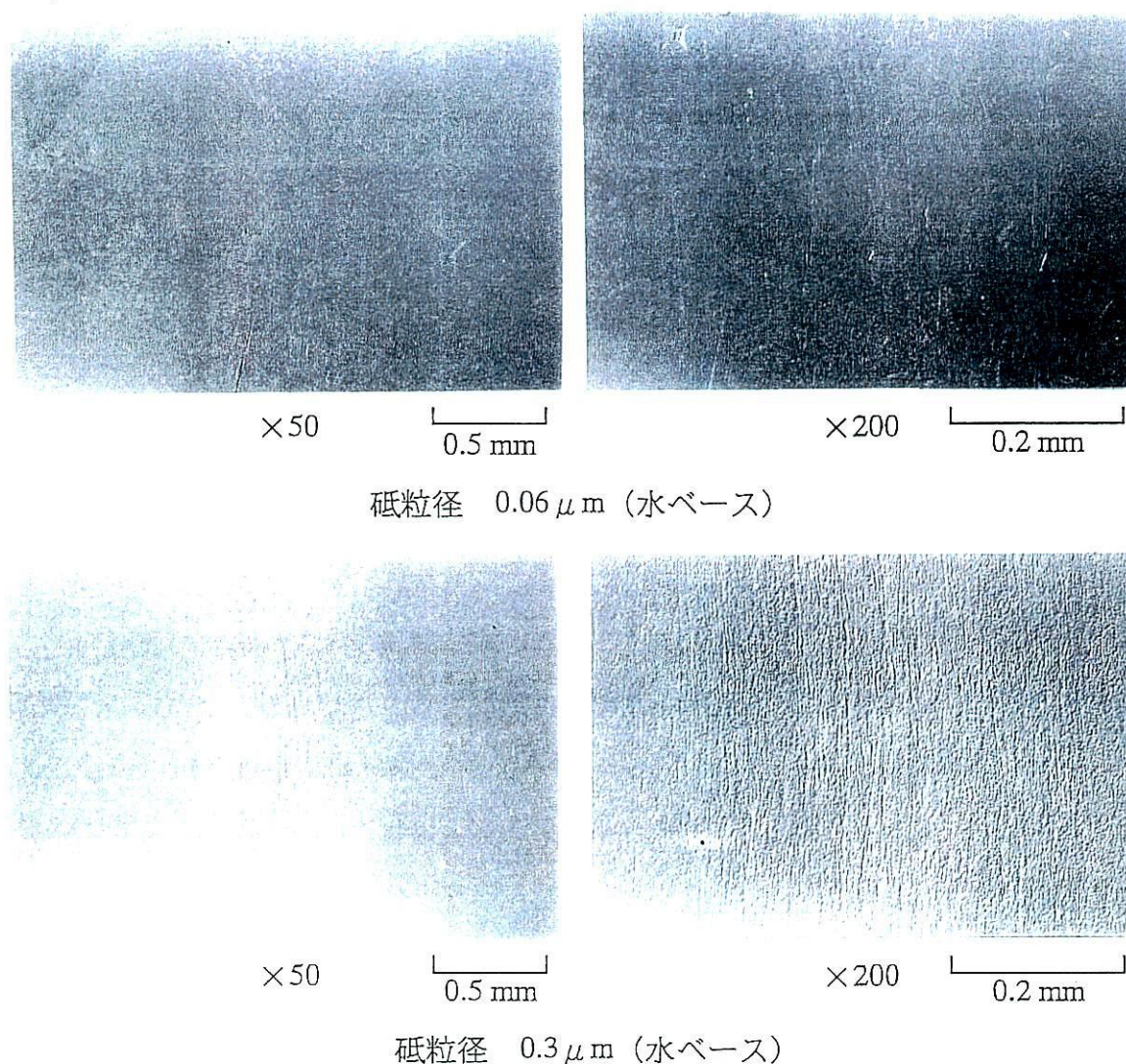


図 5.14 加工面の観察写真 (砥粒径)

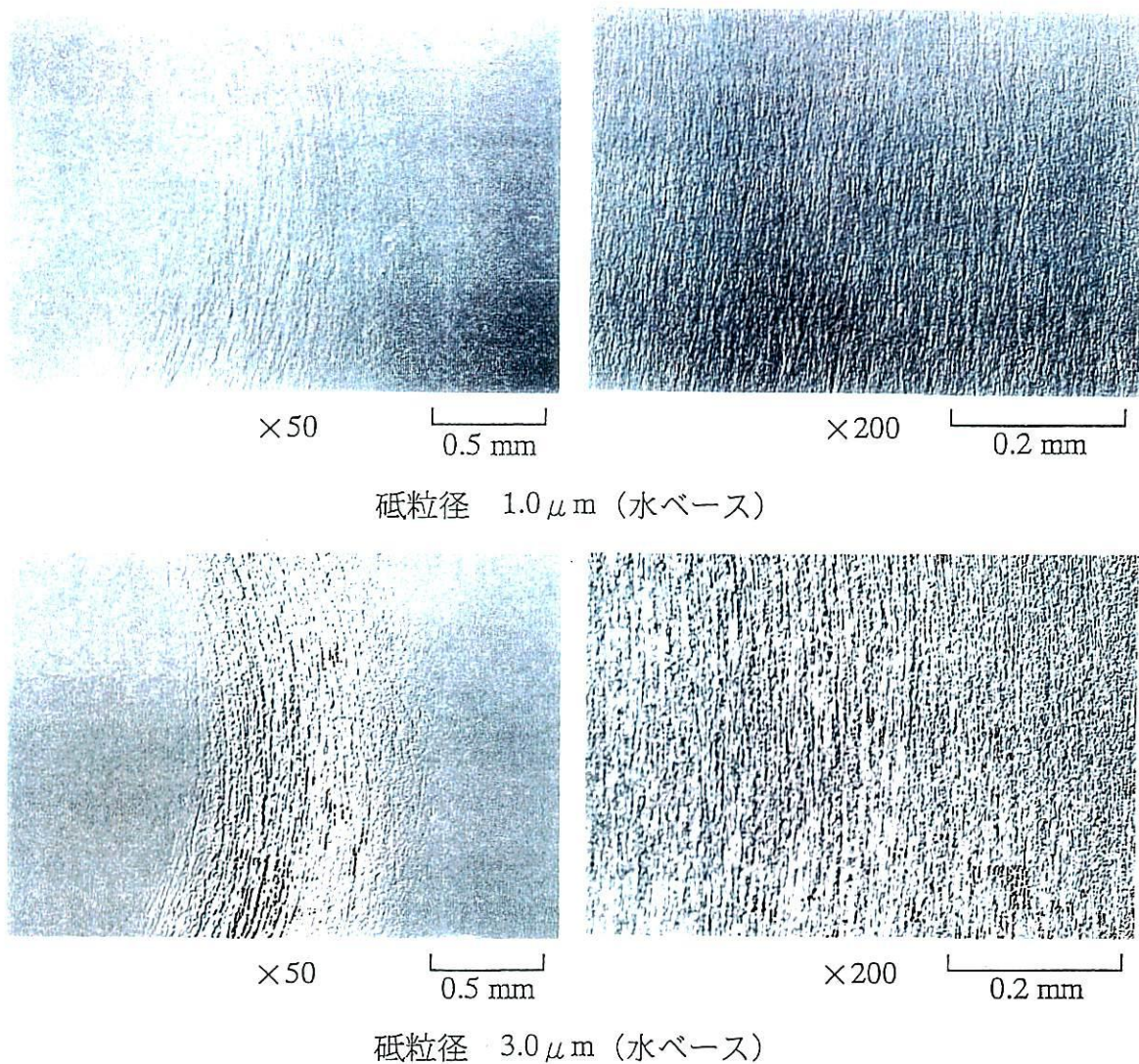


図 5.14 加工面の観察写真（砥粒径）

は、クリアランスの寸法よりも大きな砥粒が流動してきた場合、ポリシャと加工物の間に挟まれた形となり、砥粒がポリシャの回転エネルギーを直接受けたためと思われる。このため、ピット状の加工痕は、垂直方向に大きなエネルギーをもって砥粒が加工面に衝突する結果生じたものと思われる。この大きな砥粒は凝集により生じたものであると考えられている。

図 5.15 に、砥粒径と研磨溝深さの関係を示す。図 5.15 から、砥粒径が $0.3 \mu\text{m}$ 以上になると急に研磨溝深さが増大することがわかる。増大の程度はケロシンベースの方が著しく大きい。これは 3.3 節で述べたように、加工物表面上での砥粒の運動速度が砥粒径に比例して大きくなるため、それに伴って生じる遠心力も大きくなる。したがって、砥粒は、試料表面に集まり易くなると考えられる。このため、研

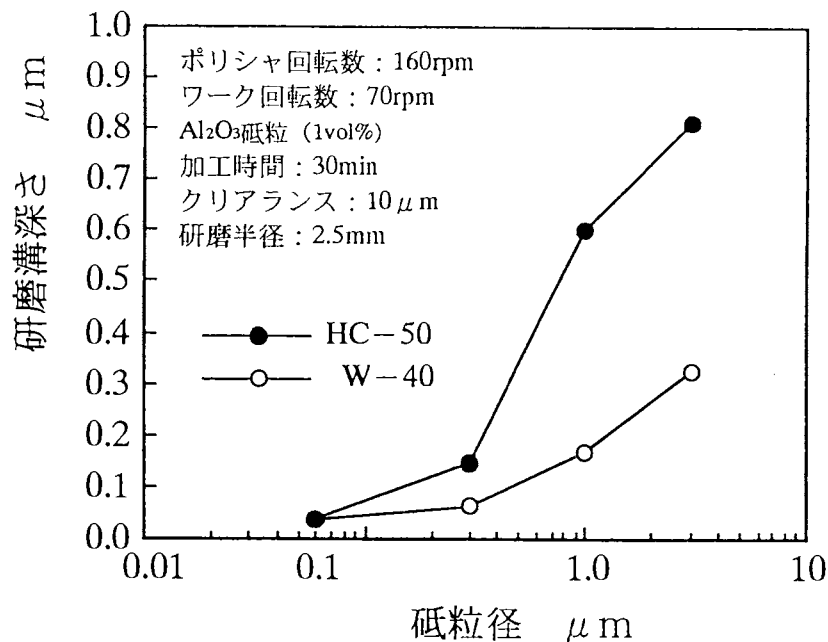


図 5.15 砥粒径と研磨溝深さの関係

磨を営む砥粒数も増加し、研磨溝深さが大きくなったものと考えられる。ケロシンベースの方が研磨溝深さが大きいのは、砥粒の流体中での動き易さが影響して、水ベースの場合よりも砥粒が加工面へ集まり易かったためと推察される。

5.2.5 研磨半径の影響

加工試料上での研磨位置が、研磨状態にどのような影響を及ぼすかを調べるために、研磨半径を種々変化させて実験を行った。研磨半径としては、1.25, 2.50, 3.75, 5.00mmと4通りに変化させた。磁性流体としては水ベース磁性流体を使用した。砥粒は、粒径1 μmのアルミナ砥粒を用いた。加工時間は30分とした。図 5.16に、研磨半径と研磨溝深さの関係を示す。また、図 5.16の中には、研磨半径が2.5mmのときの実験値を基準に取り、それとの研磨半径の比を一つの尺度として、研磨の状態を比較検討した結果（計算値）が記されている。

図 5.16から、研磨半径が大きくなると加工量が減少する様子がわかる。計算値と実験値を比較すると、研磨半径が大きくなるにつれて、実験値の方が大きいことがわかる。実験において、ワーク軸の回転による研磨点の周速度は、ポリシャの回転による周速度よりも非常に遅いため、研磨点での加工物とポリシャの相対速度は一定と考えられる。このため、ポリシャの回転による効果が主体となり、研磨能率（除

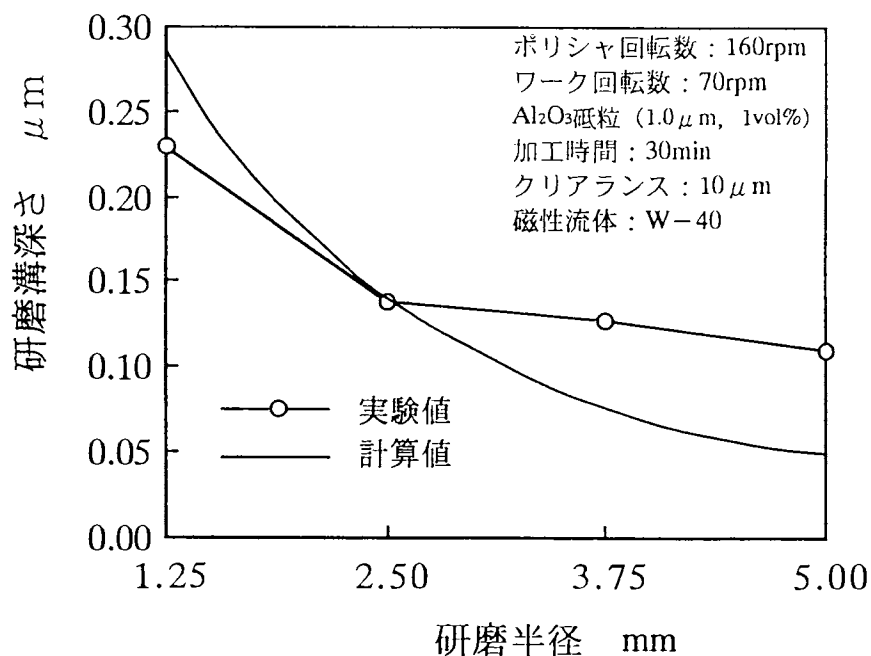


図 5.16 研磨半径と研磨溝深さの関係

去される量) はどの研磨位置でも一定であると考えられる。しかし、このように実験値と計算値に大きな差が生じるのは、磁気力による影響が現れているのだと思われる。磁石表面では中心での磁場が一番大きい。そのため、研磨半径が大きくなるにつれて磁石の中心より離れることにより、磁場の影響が減少し、実験値が計算値より大きくなっていったのだと考えられる。

5.2.6 加工に及ぼす磁性流体の粘性の影響

磁性流体の粘性が加工にどのような影響を及ぼすか検討した。粘性の異なる4種類の磁性流体 (HC-50, W-40, PA-40, LS-40) を用いて実験を行った。アルミナ砥粒 (粒径 1 μm ; 1vol%) を使用し、加工時間を30分として実験を行った。

実験結果を図 5.17 に示す。図 5.17 から、研磨溝深さは HC-50 が一番大きく、次に PA-40 の順に続く。次に W-40, LS-40 の磁性流体が同程度の値となる。磁性流体の粘度は表 4.7 に示すように、LS-40 : 450, PA-40 : 190, W-40 : 25, HC-50 : 22 mPa・s の値となっており、加工量と粘度との間に必ずしも相関関係があるとは言えないように思われる。しかし、水ベース (W-40) の磁性流体の結果を除外すると、粘度と加工量間には相関関係は認められる。水ベースの磁性流体が、何か特異な性

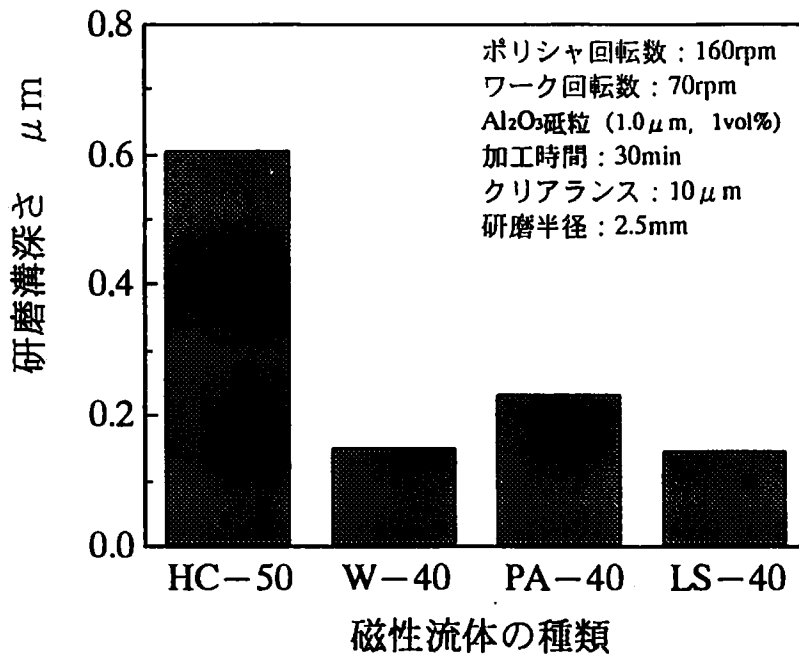


図 5.17 磁性流体の種類と研磨溝深さの関係

質を持った流体であるのではないかと考えられなくもない。

磁性流体は、マグネタイト微粒子に界面活性剤（オレイン酸）を吸着させて作られており、粒子間の凝集を防ぎ、溶媒中に一様に分散させた溶液である。重力や磁場の作用下でも安定な分散が保たれるように処理された流体である。しかしながらこれまでも述べてきたように、一様な分散を仮定した粒子モデルの説では、説明のつかない磁性流体の諸特性が実験的に得られているのも事実である。特に、水ベース磁性流体の場合には、その粘度特性や流動特性は、かなり異常なものであり、他の磁性流体とは異なっている。これらの異常現象は、粒子が一部凝集を起こし、粒子の見かけ上の大きさが増加して、磁場を印加した下での粒子のミクロな振舞いに影響を及ぼしているものと考えられている⁶⁾。

従来、磁性流体を構成しているマグネタイト微粒子同士が凝集を起こすのは、粒子間に働く磁気的な相互作用が主な要因であるとして種々の議論が進められてきた。しかしながら、同一のマグネタイト粒子で構成されている磁性流体が、分散媒が違っただけで著しい特性の違いを示すのか、理解するのは極めて難しい。特に、分散させた水ベース磁性流体が、他の有機溶媒の磁性流体と何故異なる特性を示すのか説明することは、はなはだ困難である。そこで以下に、水ベース磁性流体の粒子の凝集機構について考察することにする。

水ベース磁性流体の安定な分散状態は図 5.18 に示すような構図になっている。 Fe_3O_4 粒子表面に第一層目の界面活性剤分子が吸着し、その外に第二層目の界面活性剤分子が付着する構造をとっている。第一層目の界面活性剤分子は、親水基を粒子に、疎水基を外に向けて吸着している。しかし、第二層目の界面活性剤分子は、疎水基を第一層目の疎水基に向けて接し、親水基を外に向けている。こうして、これらの界面活性剤の衣を着たマグネタイト粒子は、水分子と安定化した状態で接している。しかしながら、親水基のすぐ内側には疎水基があり、水分子に影響を及ぼしているから、この界面活性剤分子の疎水性を考慮すると、粒子同士はお互いに近づいて水との接触面積をできるだけ小さくしようとして、弱い疎水結合を生じる。そのため粒子間には磁気力以外に、疎水結合による引力機構が働いていることになる。実際に、水ベース磁性流体の場合、磁場が作用していなくても粒子は数百個単位で凝集し、球形に近い粒子群を形成し安定化している。しかし、この状態に磁場が印加されると、粒子群が磁気モーメントを有するようになり、粒子間の磁氣的相互作用により長い棒状の凝集体を形成するという報告がある⁶⁾。

以上のように、粒子が棒状の凝集体を形成していると仮定し、粒子の凝集体を含む磁性流体の単純せん断流れを考えると、磁場の印加による見掛け粘度は実際のものより大きくなると考えられる。水ベース磁性流体中のマグネタイト粒子が粒子間の疎水結合と磁氣的相互作用により長い棒状の凝集体になることにより、水ベース磁性流体の粘度がLS-40磁性流体の粘度と同程度のものになったと考えると、図 5.17 に示したような実験結果が得られのもうなづける。

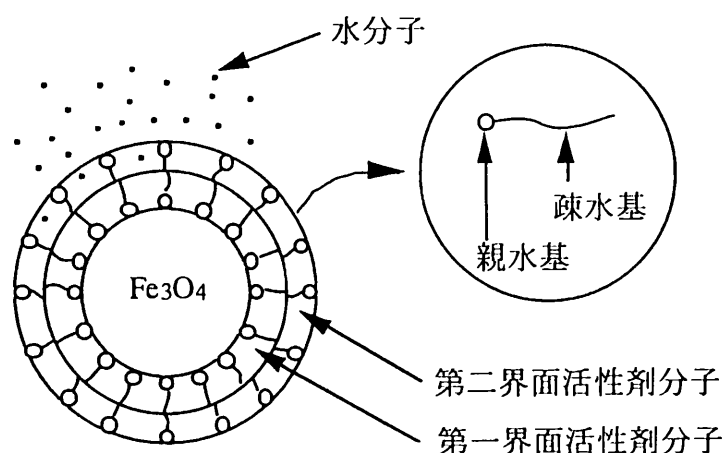


図 5.18 水ベース磁性流体中の強磁性粒子モデル

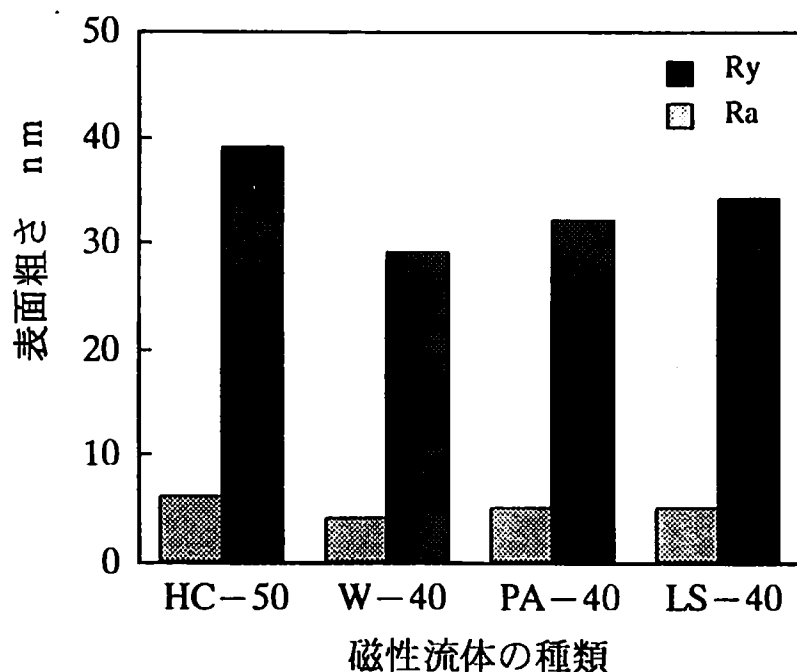


図 5.19 磁性流体の種類と表面粗さの関係

研磨後の表面粗さを図 5.19 に示す。表面粗さは使用する磁性流体の粘度が大きくなるにつれて、良好なものになるのではないかと考えられた。なぜなら、流体の粘度が大きくなるにつれて、試料表面での砥粒の動きが制約を受け、試料表面への接触の仕方も変化すると思われたからである。しかし、図 5.19 の結果より、表面粗さは使用する磁性流体の粘性に依存することなく、ほぼ一定の値をとることがわかる。

5.2.7 磁場強度と磁場勾配の影響

磁性スラリー中の砥粒は、それが存在する位置で定まる磁場の強さの影響を受け、排斥される方向に力を受ける。一方、砥粒は流体から流れに伴った力も受ける。また、その速度に伴った遠心力も受ける。この 3 つの力の合力によって、その運動状態が決まることは 3.3 節ですでに述べた。ここでは、ポリシャとワーク軸に内蔵した永久磁石によって形成される磁場が、研磨能率にどのような影響を与えるか調べる。このため幾つかの実験項目について検討を行った。

図 5.20 に、ワーク軸内磁石の位置と研磨溝深さの関係を示す。本実験では、ワーク軸内の磁石の位置を無限大、つまり軸内の磁石を取り外した実験も行っている。これは、ワーク軸内の磁石の移動が、研磨能率の向上にどの程度寄与するかを調べるために行ったものである。

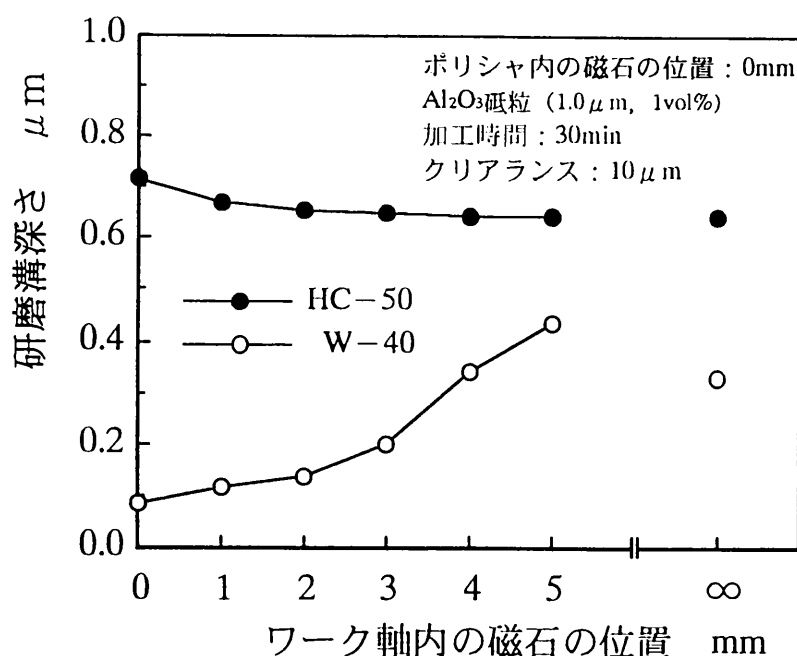


図 5.20 ワーク軸内の磁石の位置と研磨溝深さの関係

実験は、水ベース、ケロシンベースの磁性流体を用いて行った。砥粒はアルミナ砥粒（粒径 $1\ \mu\text{m}$ ）を使用し、加工時間を 30 分として行った。ポリシャ内の磁石は $\pm 0\text{mm}$ の位置にある。

図 5.20 から、ケロシンベース磁性流体を用いた場合には、水ベース磁性流体に比べて加工量が大きいことがわかる。また、図 5.20 から、ワーク軸内に設置している磁石を試料裏面から離していくと、ケロシンベース磁性流体の場合には、加工量が漸減していきやがてほぼ一定の値になる様子がわかる。一方、水ベースの磁性流体の場合には、加工量の変化はケロシンベースのそれとは全く異なることがわかる。水ベースの磁性流体の場合には、ワーク側の磁石が試料から離れるにつれて、加工量が次第に大きくなっていく。

このように、磁場を変化させると、磁性流体の違いによって加工量が変化するのは、砥粒と磁性流体の親和性が違うためではないかと考えられる。

加工量について考察する前に、水ベース磁性流体とケロシンベース磁性流体の砥粒に対する親和性について考えてみる。

粉体と液体の親和性をはかる尺度として「ぬれ性」という概念がある。これは固体表面と液体のなじみあいのことをいい、このなじみあいは、固体または液体の性質により異なってくる。これを実験的に観察する方法として、接触角試験法¹³⁾がある。これは粉体のバルク状のものに親和性をはかる液体をたらし、その液滴の盛

り上がりの状態を観察するものである。バルクと粉体という違いがあるが簡潔で良い結果を得られることからよく用いられている。実際、固体表面にたらしした液体の状態を観察するだけでなく、数値化することでさまざまな固体、液体のぬれ性を計ることができる。数値化するための計算式は次のようである。

$$W_i = \gamma_l \cos \theta \quad (5.1)$$

ここで、 γ_l は液体の表面張力、 θ は接触角である（図 5.21 参照）。 W_i は浸漬ぬれと呼ばれ、粉体層中を液体が浸透していくために必要なエネルギーである。 W_i が小さいとその流体は粉体間へ入り込み易く、したがって、その流体と固体のぬれ性は良好であるといえる。

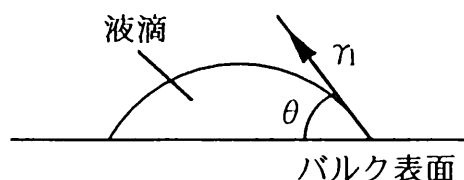


図 5.21 液滴の概略図

水、ケロシンベース磁性流体をマイクロシリンジを用い適量秤量し、アルミナのバルクに静かにたらししてみた。その様子の一例を図 5.22 に示す。カタログによる表面張力の値（W-40 : $30 \times 10^3 \text{ N/m}$, HC-50 : $26 \times 10^3 \text{ N/m}$ ）と、写真から得られた接触角の値を式（5.1）に代入して、 W_i の値をそれぞれ求めた。図 5.23 に W_i と液滴量の関係を示す。図 5.23 から、水ベース磁性流体に比べケロシンベース磁性流体の方がアルミナ砥粒との親和性が良いことがわかる。

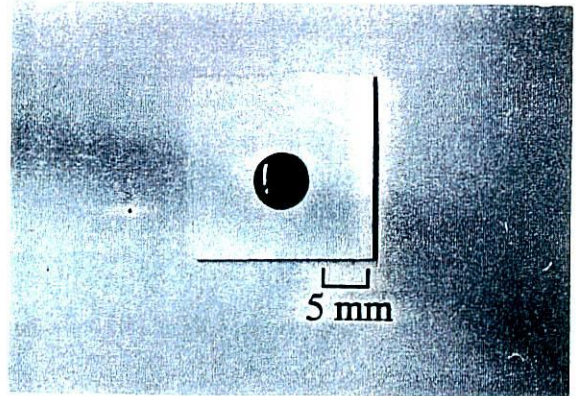
以上の実験結果を踏まえて、図 5.20 の測定結果について考察を行う。ケロシンベース磁性流体は砥粒との親和性が良いため、砥粒表面および砥粒間に磁性流体が付着しやすい。これは磁性流体内の磁性微粒子が砥粒表面に多く存在することを意味している。このため、ケロシンベース磁性流体中の砥粒は磁場の強い方に引きつけられる。ケロシンベース磁性流体を用いて研磨した場合、ワーク側の磁石が試料に近いと砥粒が加工点付近に集中するので、加工量も必然的に大きくなる。

それに対して、親和性のあまり良くない水ベース磁性流体を用いた場合、磁場の強い方には磁性流体内の磁性微粒子が集まる。このため、磁性流体内に密度差が生じ、砥粒は排斥される方向に力を受ける。そして、次第に磁場の弱い方に集中するようになる。このため、水ベース磁性流体を用いた場合、ワーク側の磁石が試料より遠ざかるにつれ加工量が多くなったと思われる。

図 5.20 から、水ベース磁性流体の場合には、磁石が遠ざかるにつれて次第に磁石



側面写真

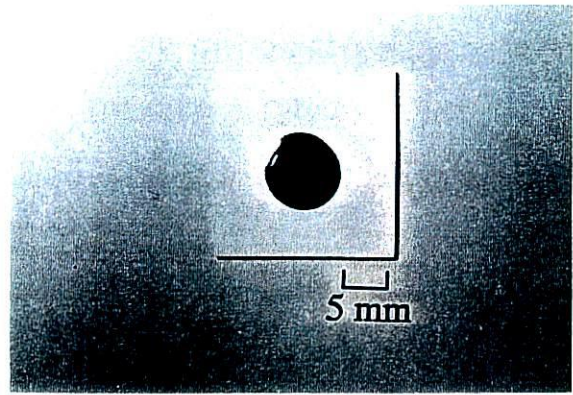


拡張の様子

水ベース磁性流体 ($10\mu\text{l}$)



側面写真



拡張の様子

ケロシンベース磁性流体 ($10\mu\text{l}$)

図 5.22 接触角の観察写真

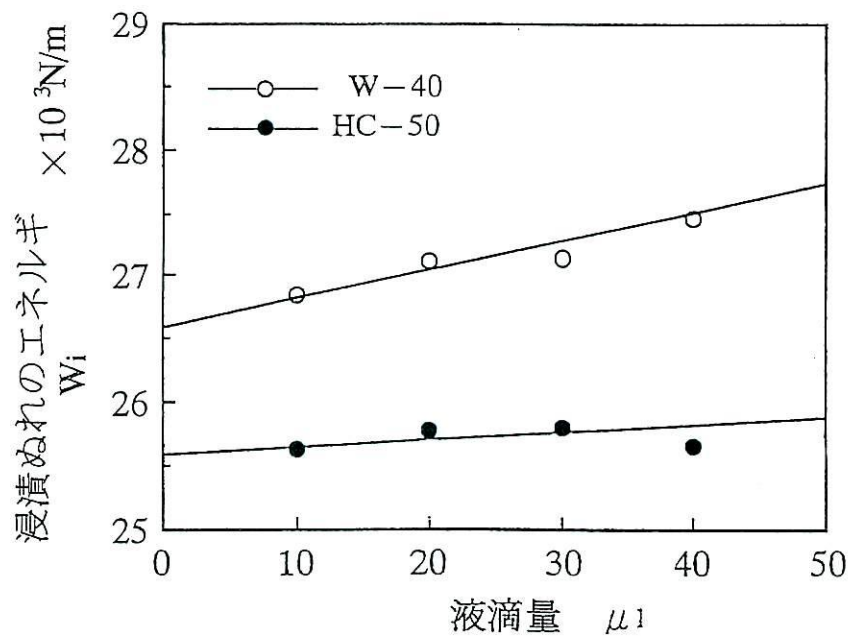


図 5.23 浸漬ぬれのエネルギーと液滴量の関係

を外して研磨を行した場合の加工量を上回っていく様子がわかる。これは、水ベース磁性流体中の砥粒が、磁場の変化に伴って生じる密度分布に鋭敏に反応して起こったためと考えられる。ワーク軸内の磁石の位置が5mm 付近においては、加工面上の磁場の強さは、ワーク軸内の磁石が無限大の距離まで離されたときの磁場の強さよりも小さい。すなわち、5mmの位置近傍では、磁場勾配も変化していると言える。3.3節で考察した磁場勾配の変化が加工量の増加をもたらすという理論結果をある程度実証しているものと思われる。

図 5.24 は、ワーク軸内の磁石の位置を変化させ、砥粒を 0.3, 1.0, 3.0 μm と変えて実験を行った場合の結果を示している。実験は、水ベースの磁性流体を用い、加工時間を 30min として行った。ポリシャ内の磁石は 0mm の位置である。図 5.24 から、いずれの粒径の砥粒の場合でも、ワーク軸内の磁石の位置を遠ざけていくと、つまり、試料表面の磁場の強度を弱くしていくと、加工量が増加していくことがわかる。砥粒径が大きくなるにつれてその増加の割合が大きい。これは、密度差から生じる砥粒の排斥力は、砥粒の体積に比例すると考えられる。アルキメデスの原理に則しているとも言える。

磁石が遠方に遠ざかると、磁石を外したときの加工量を上回るようになる結果が得られたのも、先に述べた通りである。この原因としては、ポリシャ内、ワーク軸内の双方の磁石の位置の兼ね合いにより、磁場勾配が変わり、ポリシャ方向から加

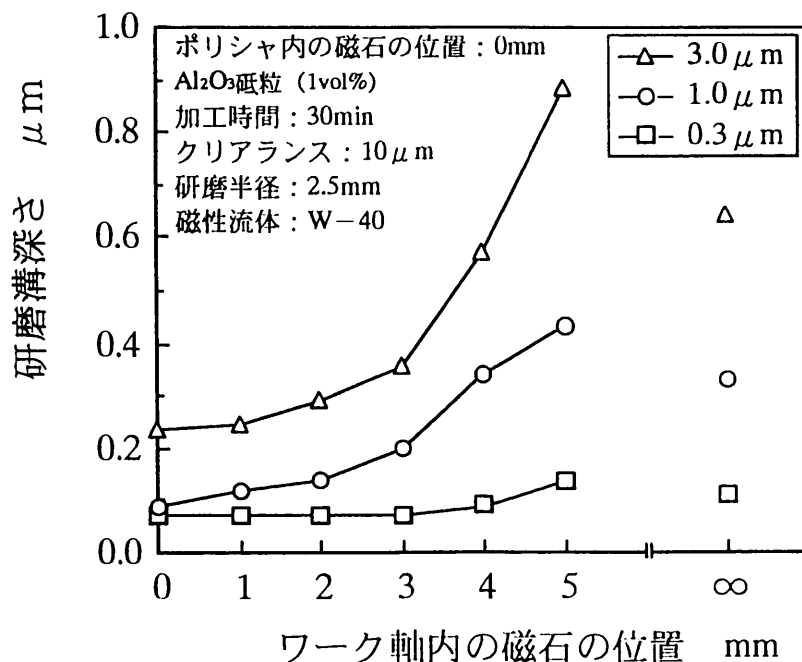


図 5.24 ワーク軸内の磁石の位置と研磨溝深さの関係

工物の方向に変化した結果生じたものと考えられる。加工量の増加の割合が、砥粒径の大きさに依存していたのと同様に、磁石を外したときの加工量を上回る様態も、砥粒径に依存していることがわかる。

図 5.25 に、ワーク軸内の永久磁石の位置を変化させて研磨実験を行ったときの加工面の観察写真を示す。0.3 μm の粒径の砥粒を用いた場合、ワーク軸内の磁石の

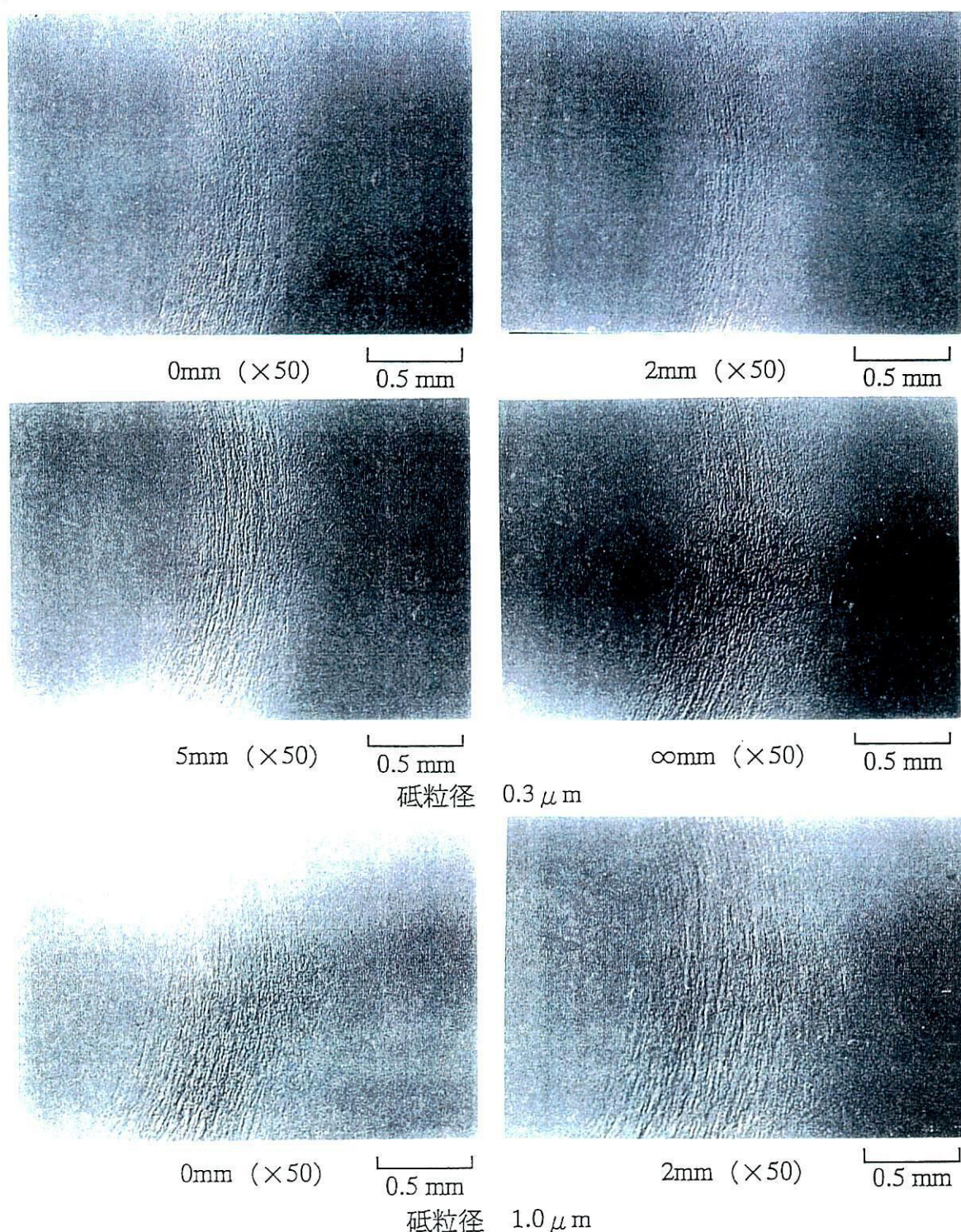


図 5.25 加工面の観察写真（ワーク内磁石の位置）

位置が変化しても研磨面の様子にあまり変化がないのがわかる。しかし、粒径が大きくなると、磁石が遠ざかるにつれて研磨溝深さが大きくなり、形状が明瞭になってくる。また、磁石の位置が5mmの場合の研磨痕の様態は、磁石を取り外した場合より加工が良好に行われている様子がわかる。

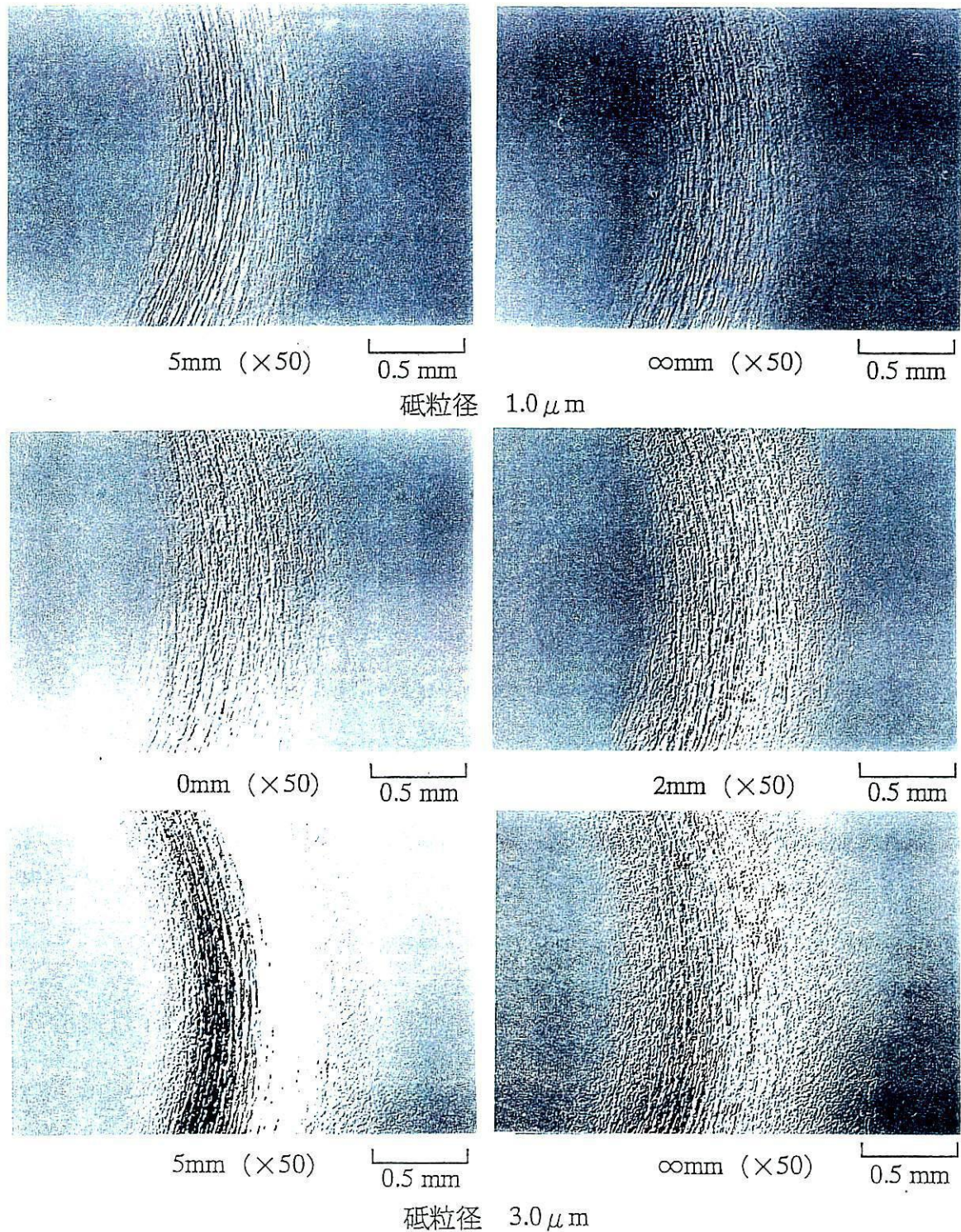


図 5.25 加工面の観察写真（ワーク内磁石の位置）

図 5.26 は、図 5.20 および図 5.24 の実験結果を表面粗さの観点から整理して見たものである。図 5.26 から、加工点付近の磁場を変えても表面粗さの変化がないことがわかる。しかし、同一の磁性流体を用い砥粒径を変化させた場合には、粒径が大きくなるほど表面粗さの値は大きくなる。また、同一粒径で磁性流体を変えた場合には、ケロシンベース磁性流体を用いたものの値が若干大きいことがわかる。これはケロシンベース磁性流体の流動特性が良好で、加工面上での砥粒の運動が活発であったためと考えられる。

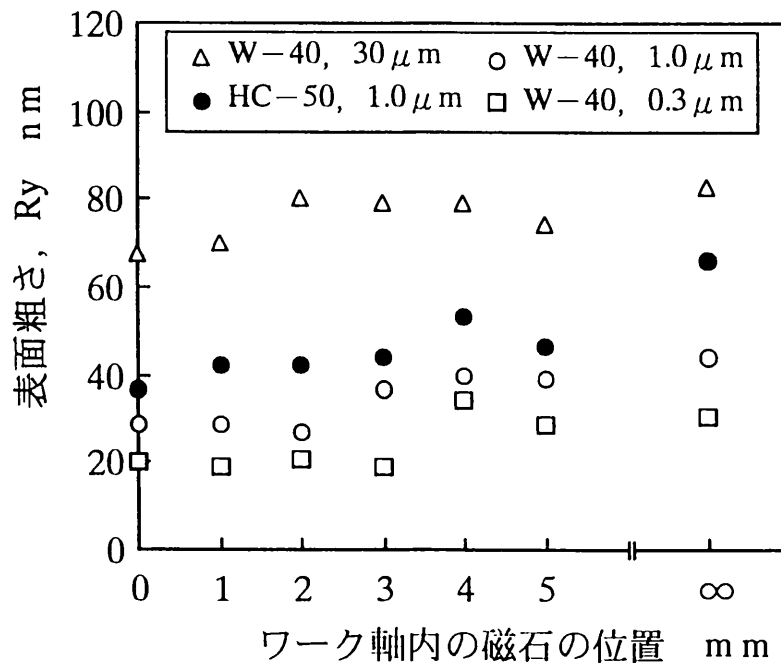


図 5.26 ワーク軸内の磁石の位置と表面粗さの関係

砥粒濃度を 1, 2, 3vol % と変え、また、ワーク軸内の磁石の位置を変化させて実験を行った場合の実験結果を図 5.27 に示す。実験は、水ベースの磁性流体を用いて行った。砥粒はアルミナ砥粒（粒径 $1\ \mu\text{m}$ ）を使用し、加工時間を 30 分として行った。ポリシャ内の磁石は 0mm の位置にある。図 5.27 から、磁石の位置が加工物裏面から遠ざかるにつれて加工溝深さは次第に増加することがわかる。また、砥粒濃度が大きくなるにつれて研磨溝深さの増加の度合いが大きくなる。磁石の位置が遠くなるにつれて砥粒は磁場の弱い加工物面側へと集まる（排出される）ようになり、研磨に関与する砥粒数も増えるためと予想される。砥粒濃度が 3vol % と多い場合には、研磨に関与する砥粒数も多くなり、それだけ増加の度合いも大きくなったものと考えられる。

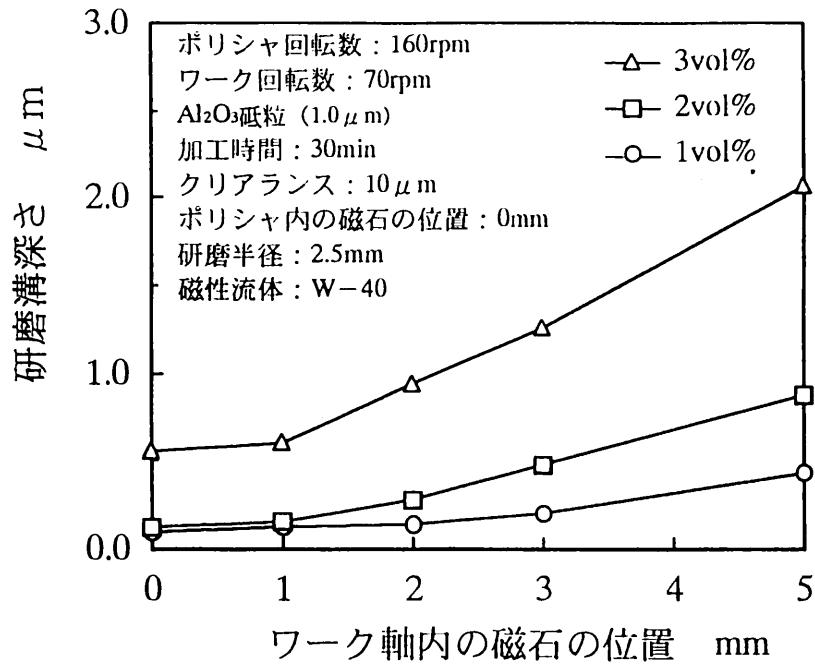


図 5.27 ワーク軸内の磁石の位置と研磨溝深さの関係

図 5.28 は、ワーク軸内磁石の極配置を変化させた（試料裏面に S 極を配置）場合のワーク軸内磁石の位置と研磨溝深さの関係を示している。図 5.28 には、試料裏面に N 極を配置して実験した場合（図 5.20 中の水ベース磁性流体の場合の実験結果）の測定結果も併載している。図 5.28 から、試料裏面に S 極を配置した実験を行った場合、いずれの磁石位置でも、磁石を外して実験を行ったときの研磨溝深さの値を

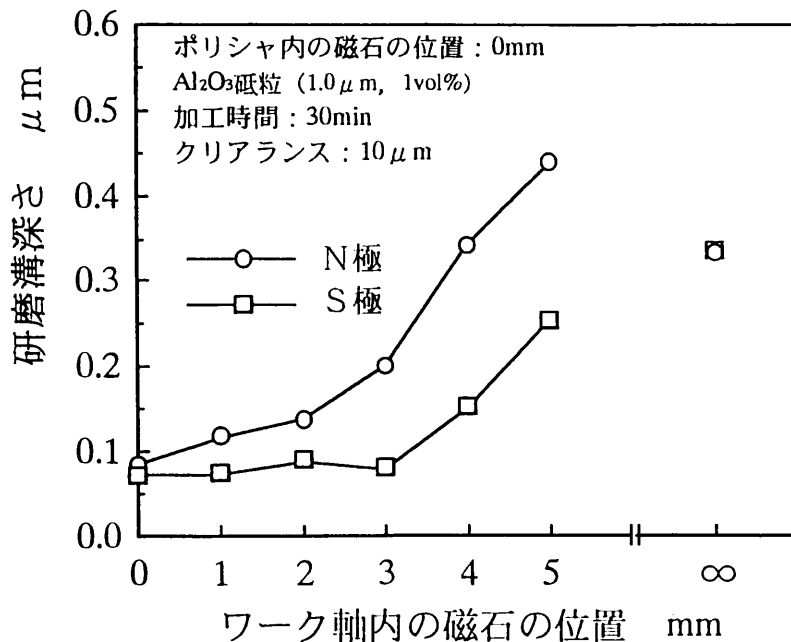


図 5.28 ワーク軸内の磁石の位置と研磨溝深さの関係（磁極変化）

上回らないことがわかる。これは、磁力線がポリシャ内磁石のN極からワーク軸内磁石のS極に向かってスムーズにはしっている空間の中に、研磨点が存在するためだと考えられる。ワーク軸内の磁石の移動により、磁場の向きが一定で強度のみが変化する現象が生じたためと推察される。

次に、ワーク軸内の磁石を固定し、ポリシャ内の磁石の位置を変化させ実験を行った。図 5.29 は、ポリシャ内の磁石の位置と研磨溝深さの関係を示したものである。図 5.29 は、ワーク軸内の磁石の位置をそれぞれ 0mm, 2mm, 5mm に設定し、各位置でポリシャ内の磁石を -3mm から 3mm まで動かして実験を行った。磁性流体は水ベースのものを使用した。ワーク軸内の磁石の位置が 0mm の時は、ポリシャ内の磁石が -2mm の位置で最大の値になっている。また、ワーク軸内の磁石の位置が 2mm の時は、ポリシャ内の磁石が 2mm の位置で最大の値になっている。これは、それぞれの場合、その位置でポリシャおよびワーク軸内の磁石の兼ね合いにより生じる加工試料方向の磁場勾配が最大になったためだと考えられる。しかし、ワーク軸内の磁石の位置が 5mm の場合には、ポリシャ内の磁石の位置が 0mm のときに加工量が最大になっている。これはワーク軸内の磁石からの影響が小さいがためと思われる。なぜなら、ポリシャに内蔵されている磁石は、図 5.30 のような極配置になっているため、ワーク軸内の磁石の影響がない場合には、磁石の厚みの中心線上が磁

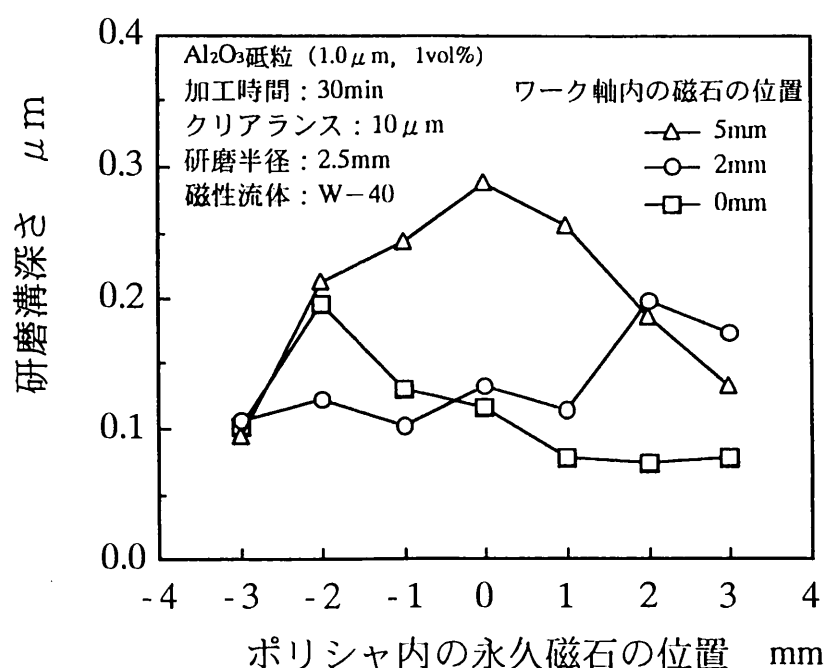


図 5.29 ポリシャ内の磁石の位置と研磨溝深さの関係

場強度が小さくなる。したがって、ワーク軸内の磁石の影響がない場合には、そこに砥粒が集中すると考えられるからである。

図 5.31 に、ケロシンベースの磁性流体を用いた場合のポリシャ内の磁石の位置と研磨溝深さの関係を示す。ワーク軸内の磁石は2mmの位置に固定している。水ベース磁性流体の加工量は、図 5.29 のワーク軸内磁

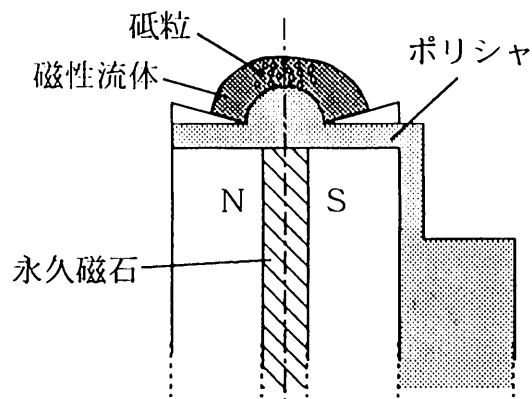


図 5.30 磁性流体中の砥粒の集中
(水ベース磁性流体)

石が2mmのものと同じものであり、比較のために記載している。ケロシンベースの磁性流体を用いた場合、磁場の影響を受けずほぼ一定の加工量となることがわかる。これは、ワーク軸内の磁石の位置をパラメータとして実験を行った場合と同様の現象である。ワーク軸内磁石が試料裏面に近い場合、砥粒は試料表面に磁性微粒子とともに磁着している。その力は大きく、ポリシャ内磁石の磁場の影響をあまり受けない。このため、ポリシャ内磁石の移動による研磨溝深さの変化はあまり見られなかったと思われる。

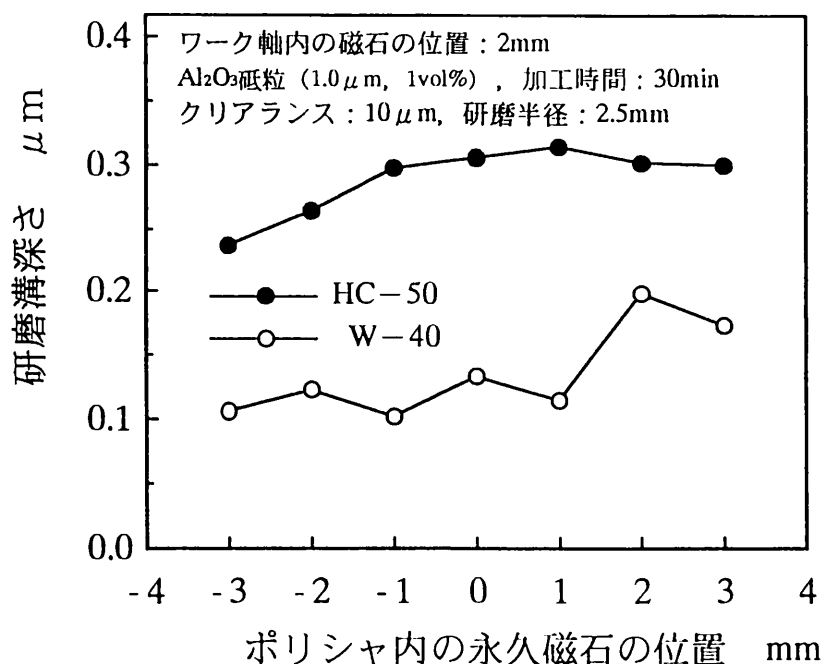


図 5.31 ポリシャ内の磁石の位置と研磨溝深さの関係

本項の最後に、前項までのケロシンベース磁性流体を用いて得られた実験結果について考察し直さなければならない。なぜなら本項では、3.3節での理論的考察（4種類の磁性流体の中でもケロシンベース磁性流体を用いた場合には、その中に懸濁された非磁性砥粒は磁場からの一番大きな影響（排斥力）を受ける）とは異なり、親和性の観点から、ケロシンベース磁性流体内の非磁性体は、表面に付着する磁性体とともに磁場の強い方に引き付けられると考えたからである。ただし、この仮定は砥粒のように体積が非常に小さなときのみ適用し得ると考えられる。なぜかという、体積が大きくなるにつれて一定体積に対する表面積の割合（表面積／体積）が減少し、表面に付着している磁性体のために生じる磁気力（この場合、引力になる）の影響が小さくなるからである。

ここで、ケロシンベース磁性流体を用いた場合、砥粒が磁場の強い方に集まると仮定し、前項までで得られたケロシンベース磁性流体の実験結果について再検討してみる。

ケロシンベース磁性流体を用いた場合、研磨溝深さは全体的に大きいものであった。これは、ケロシンベース磁性流体の粘度が小さいということもさることながら、加工点付近の砥粒数が水ベース磁性流体より多かったためと考えられる。

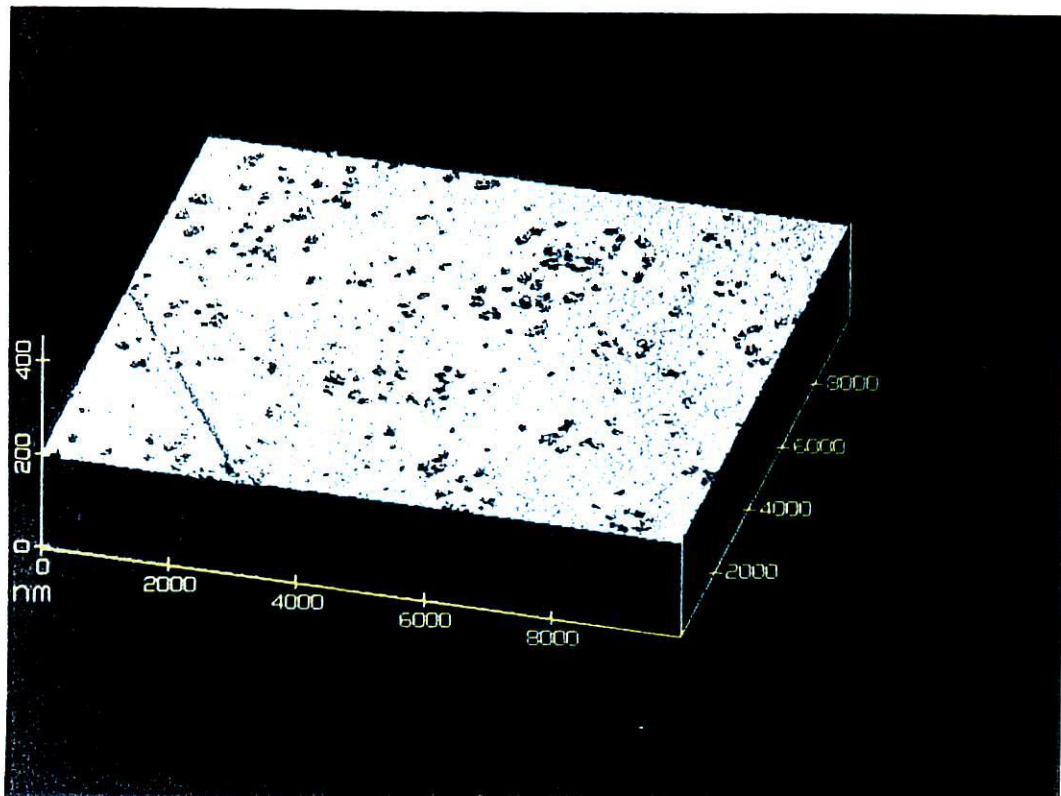
クリアランスが一定以上になると、ケロシンベースを用いた場合に得られた研磨溝深さは、水ベース磁性流体のそれよりも小さくなることがわかった（図 5.8）。これは、クリアランスの増加により減少した流体の流速では、磁気力によって試料表面に吸着する砥粒を動かせなかったために生じた現象であると考えられる。

以上の2点が前述の仮定の下での新しい考察である。ケロシンベース磁性流体中の砥粒が、磁場の強い方に集まるという仮定を何らかの実験で確かめなければならない。しかしながら、これを証明することはいささか困難に思える。なぜなら、磁性流体は固体と液体を混ぜた固液混合流体であるため、複雑な性質を有しているとともに、黒色状で外部からの視覚的観察も不可能なためである。

磁性流体別の磁場印加による砥粒分布の検討は、以後の課題としておく。

5.2.8 A F M (Atomic Force Microscope) による加工痕の観察

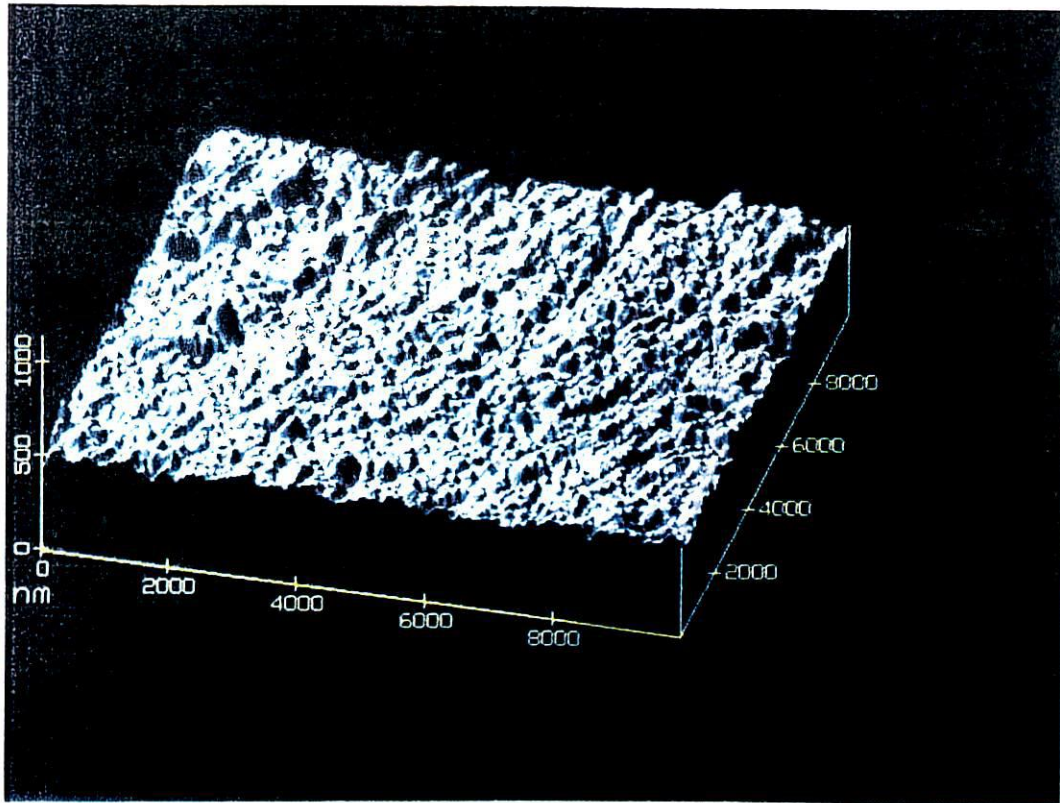
シリコンウエハ表面の加工痕の様態とその生成形態を考察するために、間接的ではあるがフロートガラスを加工し^{*)}、A F Mを用いてその加工痕の観察を行った。フロートガラスをシリコンウエハの代用としたのは、シリコンウエハの場合、表面吸着層の影響などにより観察が困難なためである。ここでは、研磨作用における砥粒の挙動をより詳しく調べるため、砥粒径をパラメータとしてフロートガラスをシリコンウエハと同様な条件で加工し、観察を行った。A F Mによる観察写真を図 5.32 に示す。図 5.32 の (a) は前加工面を示している。以下、(b) は粒径 $3.0\ \mu\text{m}$ 、(c) は粒径 $1.0\ \mu\text{m}$ 、(d) は粒径 $0.3\ \mu\text{m}$ 、(e) は粒径 $0.06\ \mu\text{m}$ 、の砥粒を用いて研磨を行った場合の A F M 像である。



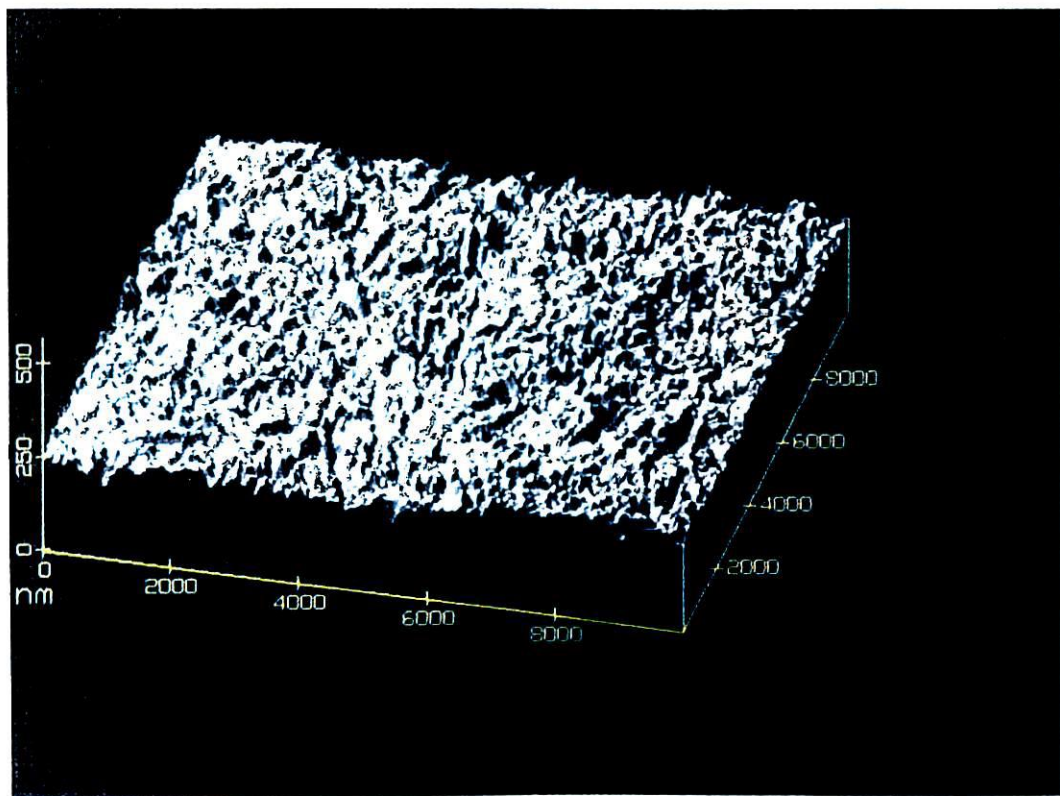
(a) 前加工面

図 5.32 A F M 観察写真

^{*)} 観察に供している A F M は、シリコンウエハに対する観察・測定能力が劣っているため、ウエハの研磨面には適用できなかった。

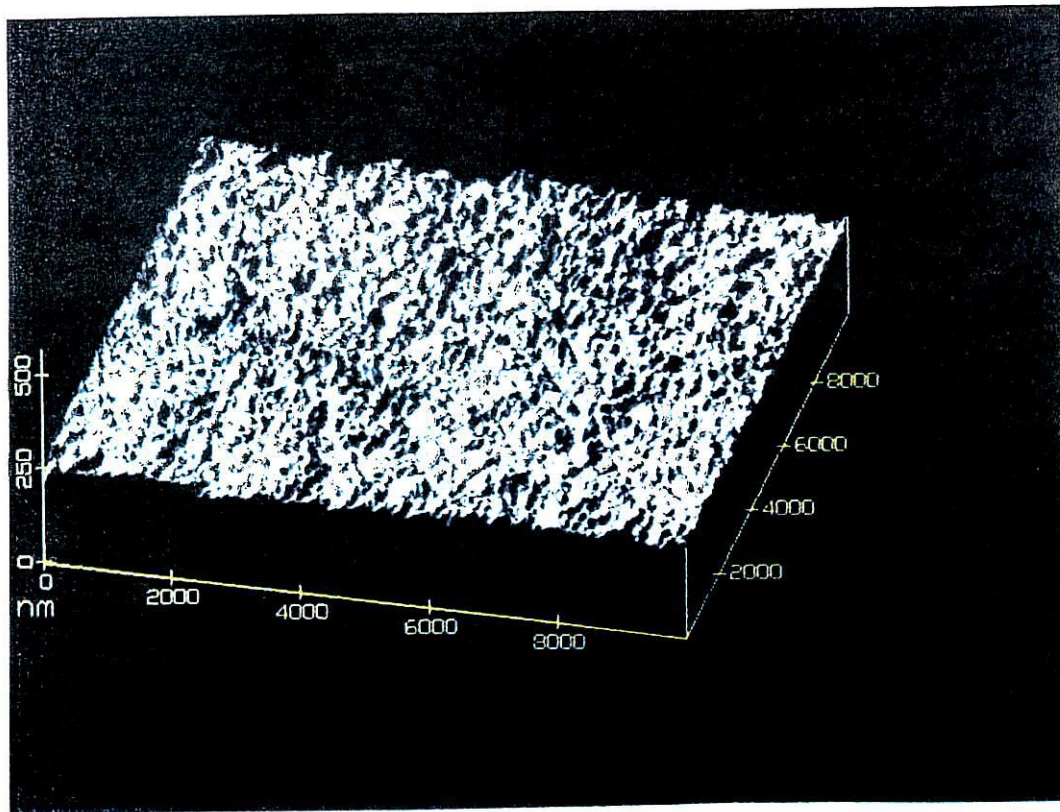


(b) Al_2O_3 ($3.0\ \mu\text{m}$)

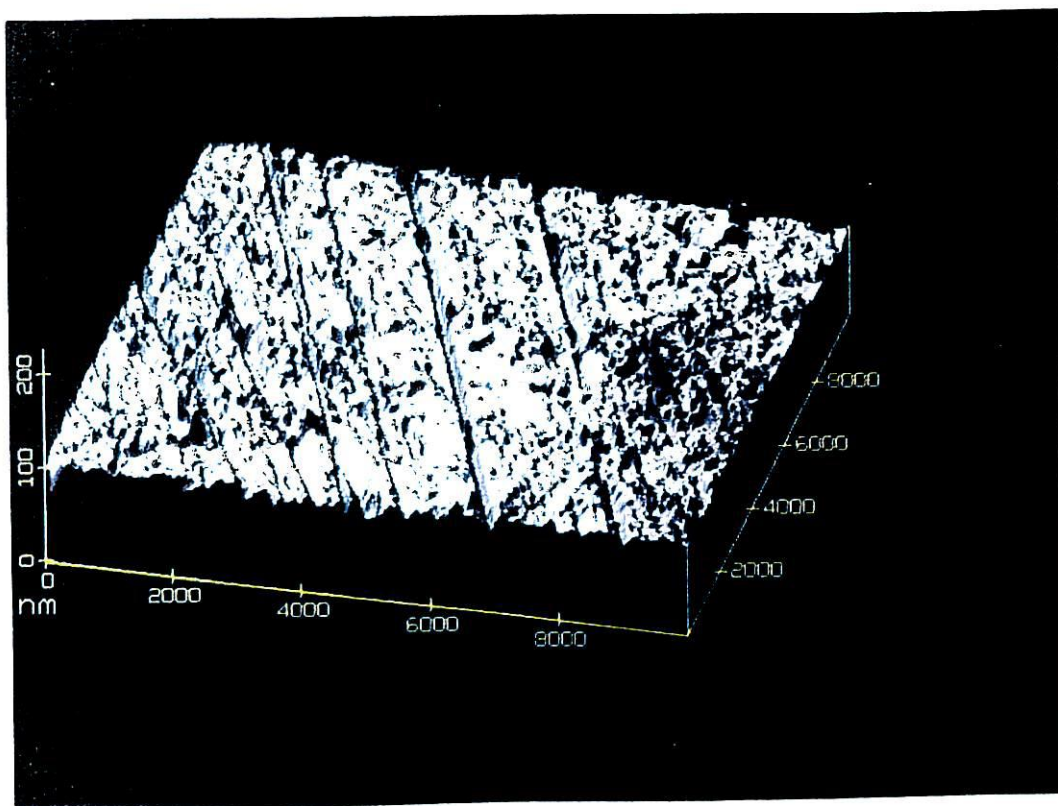


(c) Al_2O_3 ($1.0\ \mu\text{m}$)

図 5.32 A F M 観 察 写 真



(d) Al_2O_3 ($0.3\ \mu\text{m}$)



(e) Al_2O_3 ($0.06\ \mu\text{m}$)

図 5.32 A F M 観察写真

図5.32のA F M像を通観すると、その加工痕の様態は、前節までで観察された光学顕微鏡の写真とかなり異なる。これまでに得られた光学顕微鏡での観察写真から、研磨痕は一直線に伸びた微小な加工痕の集合体で形成されていた。しかしながら、A F Mで観察した研磨痕は、ランダムに並んだピット状の加工痕から形成されており、筋状の加工痕が見られない。これは、加工試料が異なることが原因していると思われる。このような違いが生じた明確な理由はわからないが、フロートガラスを用いた場合、砥粒が加工面上を転がり、梨地状の加工面が得られたためと考えられる。

研磨面の凹凸は、使用する砥粒径の増大とともに大きくなっている。0.06 μm の砥粒を用いた場合のA F M像では、加工面の奥（写真の上方）から手前にかけて一直線に伸びる数本の条痕が観察される。これは、その大きさと入り込み方から判断して、凝集した砥粒がポリシャの回転動力を直に受け、加工面に作用してできたものと思われる。大きな加工条痕が見られるもの以外の面については、極微小な加工痕が存在する研磨面となっており、非常に良好な仕上げ面となっていることがわかる。その凹凸の寸法形状から判断して、表面粗さは十数 nm 程度になっていることにも理解し得るように思われる。

5.3 平面研磨加工に関する実験結果と考察

5.3.1 研磨回数の影響

本研磨装置を用いて平面研磨が可能かどうか検討するため、ワーク軸をY軸方向に駆動して実験を行った。図 4.9 に示すように、所定の距離だけY軸方向に駆動した場合の研磨面は、幅の広い研磨痕となる。

実験では、研磨時間が面の創成にどのような影響を及ぼすかを調べた。その際、研磨回数をパラメータとした。研磨回数とは、決められた2点間の研磨半径の間をポリシャが動く回数である。実験では、研磨半径を2mmと6mmの間、すなわち4mm移動させたときを研磨回数1回とカウントしている。また、全ての実験においてポリシャとワーク軸の回転数は一定であり、それぞれ160rpmと70rpmとしてある。磁性流体は水ベースのものを使用した。

実験条件は次の通りである。砥粒は粒径 $1\mu\text{m}$ のアルミナ砥粒で、体積濃度を1vol%とした。クリアランスは $10\mu\text{m}$ 、ポリシャとワーク内の磁石の位置はそれぞれ0mmと2mmとしてある。

図 5.33 に研磨回数を1, 3, 5回と変えて、実験した場合の研磨痕の断面形状を示す。図 5.33 から、研磨回数が増えるにつれて断面形状が次第と明瞭になり、加工量が増加することがわかる。さらに、中心部が面の外側に対して深く削られている様子もわかる。これは、送りの速度が一定で単位送り幅当たりの研磨能力は変わらず、このため、円周が小さくなるほど単位面積当たりの研磨量が大きくなったものと考えられる。

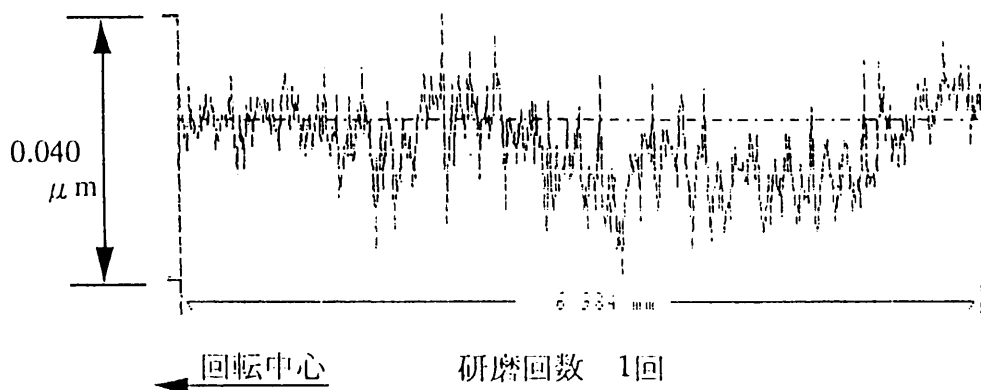


図 5.33 研磨面の断面形状（研磨回数）

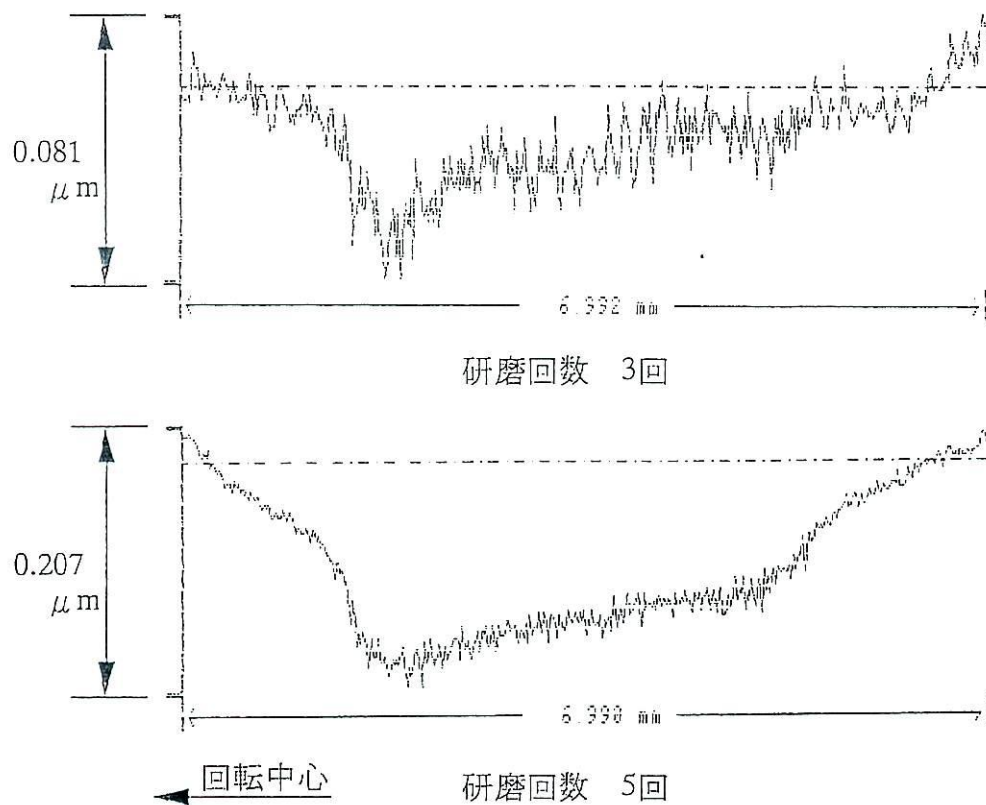


図 5.33 研磨面の断面形状（研磨回数）

研磨回数が少ない場合には、研磨面の断面形状は明瞭ではない。これは、シリコンウエハの表面自体にうねりがもともとあるためである。そこで、光の干渉を利用して、シリコンウエハのうねりを観察してみた。図 5.34 に観察されたうねりの様子を示す。干渉縞の一つの間隔は約 $0.03 \mu\text{m}$ 相当の高低差を示している。観察写真から、研磨した面の 4mm の間には、約 $0.03 \mu\text{m}$ のうねりが存在することがわかる。本

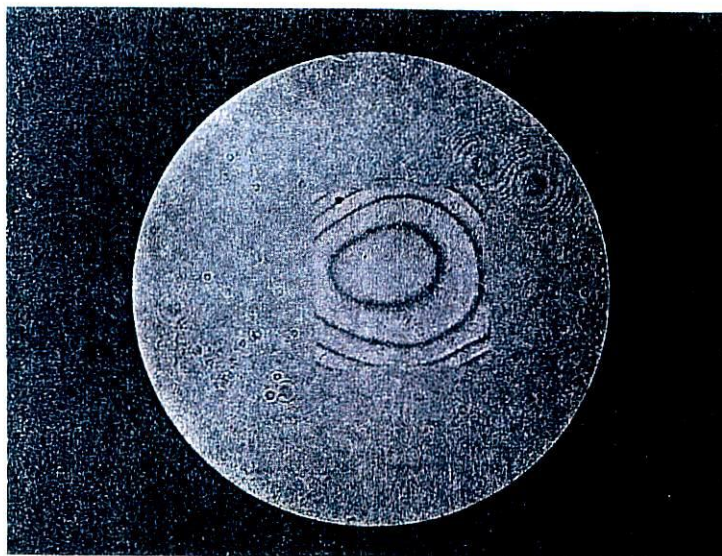


図 5.34 シリコンウエハのうねりの観察

観察より、研磨量が $0.03\text{ }\mu\text{m}$ を上回らない試料の断面形状の測定は困難であると言える。しかしながら、研磨面には、加工痕が肉眼でははっきりと認められるのも事実である。

図 5.35 に、研磨回数を 1, 3, 5 回として得られた加工面の観察写真を示す。図 5.35 から、研磨面の加工痕は溝研磨加工の場合と同様に、同心円上に並ぶ無数の加工痕によって形成されている様子がわかる。研磨回数が少ない場合、シリコンウエハ自体のうねりのために、はっきりとした断面形状が得られなかったが、観察写真から研磨回数が 1 回でも加工が良好に行われているのが認められる。さらに研磨回数が増やしていくと、次第に研磨面の加工痕が明瞭に見えてくる。

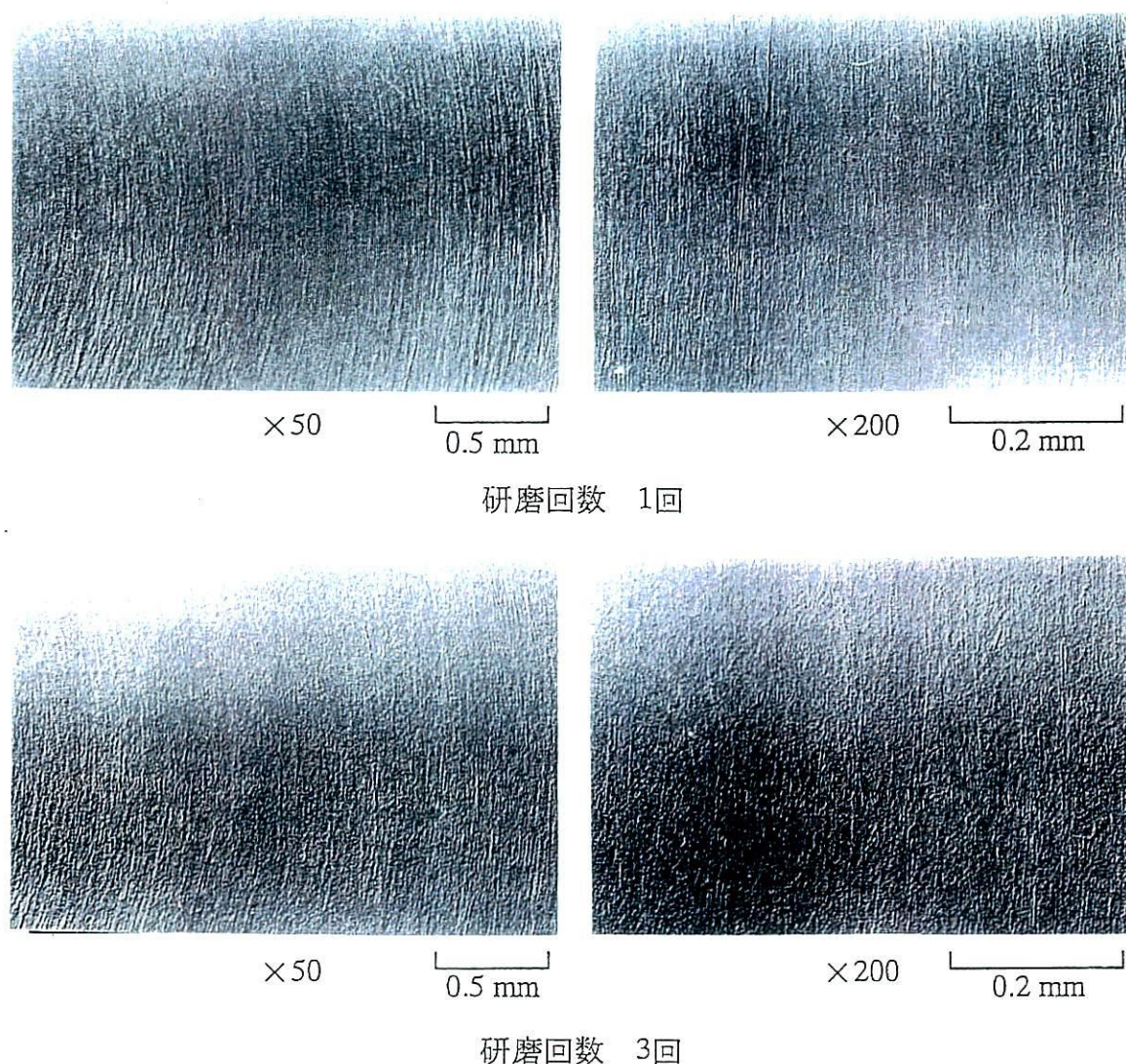


図 5.35 加工面の観察写真（研磨回数）

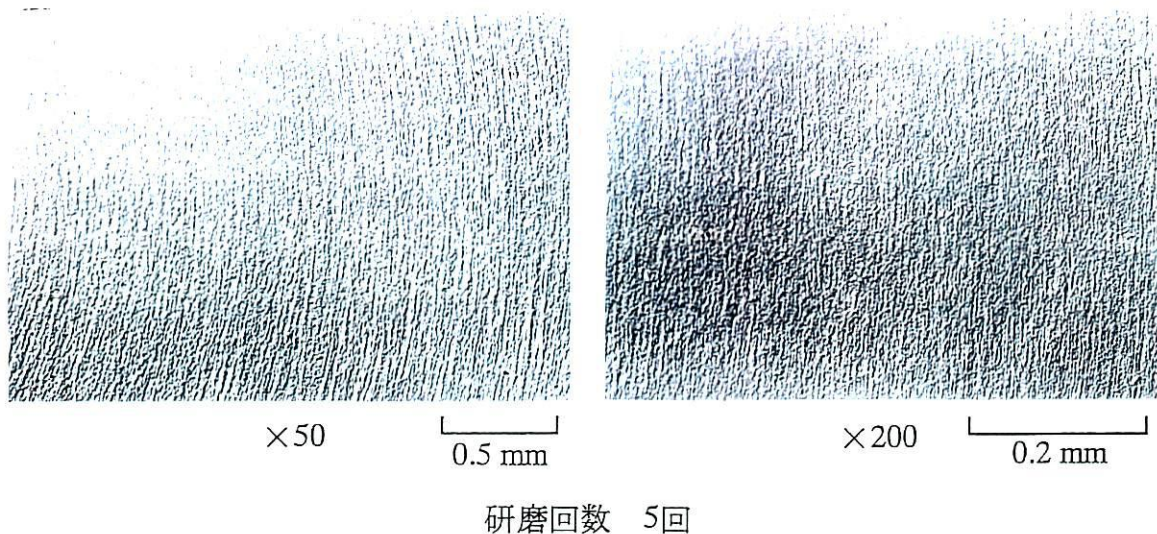


図 5.35 加工面の観察写真（研磨回数）

図 5.36 に、研磨回数と表面粗さの関係を示す．図 5.36 から、研磨回数が多くなるにつれて表面粗さ，特に Ry の値が大きくなる様子がわかる．これは、シリコンウエハのポリシ面を研磨しているため、加工の初期段階では表面を荒らす形になったためである．しかし、5.2.1 項の加工時間と表面粗さの関係のように、これ以上研磨回数が多くなっても表面粗さの値は増加せず、一定の値になっていくと予想される．

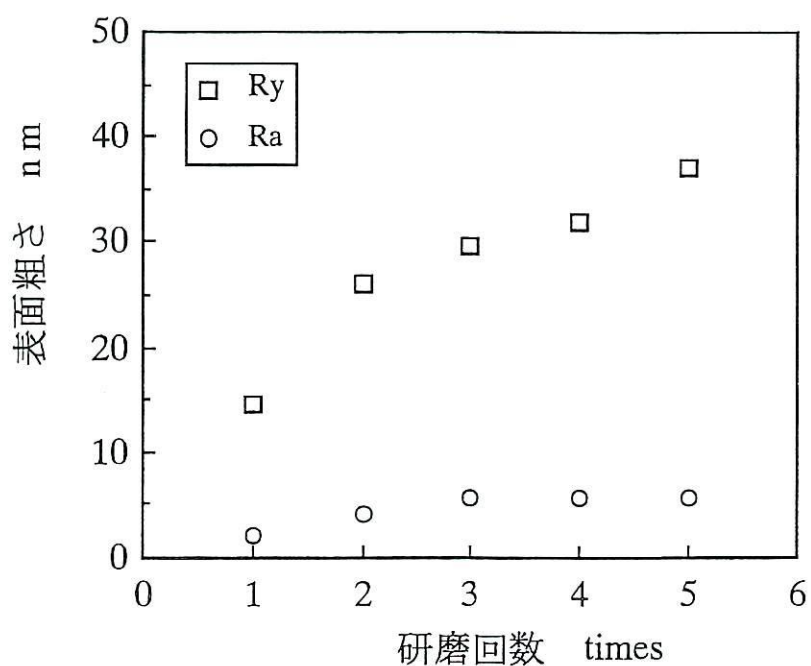


図 5.36 研磨回数と表面粗さの関係

5.3.2 磁場強度と磁場勾配の影響

ポリシャとワーク軸内に設置されている両永久磁石によって形成される磁場が、平面研磨加工にどのような影響を及ぼすのか調べた。特に、研磨面の形状や表面粗さについて検討した。実験は、ワーク軸内にセッティングされている磁石の位置を変化させる形で行った。実験では、送り回数を3回とした。

図 5.37 に、ワーク軸内の磁石の位置を 0, 1, 2, 3, 5mm と変えた場合の研磨面の断面形状を示す。溝研磨の場合と同様に、磁石が加工試料から離れるにつれて加工量が次第に大きくなり、それと平行して研磨面の断面の形状も明瞭となってくる。5.3.1 項に記した、研磨回数の影響の場合と同様、回転中心に近いほど加工量が大き

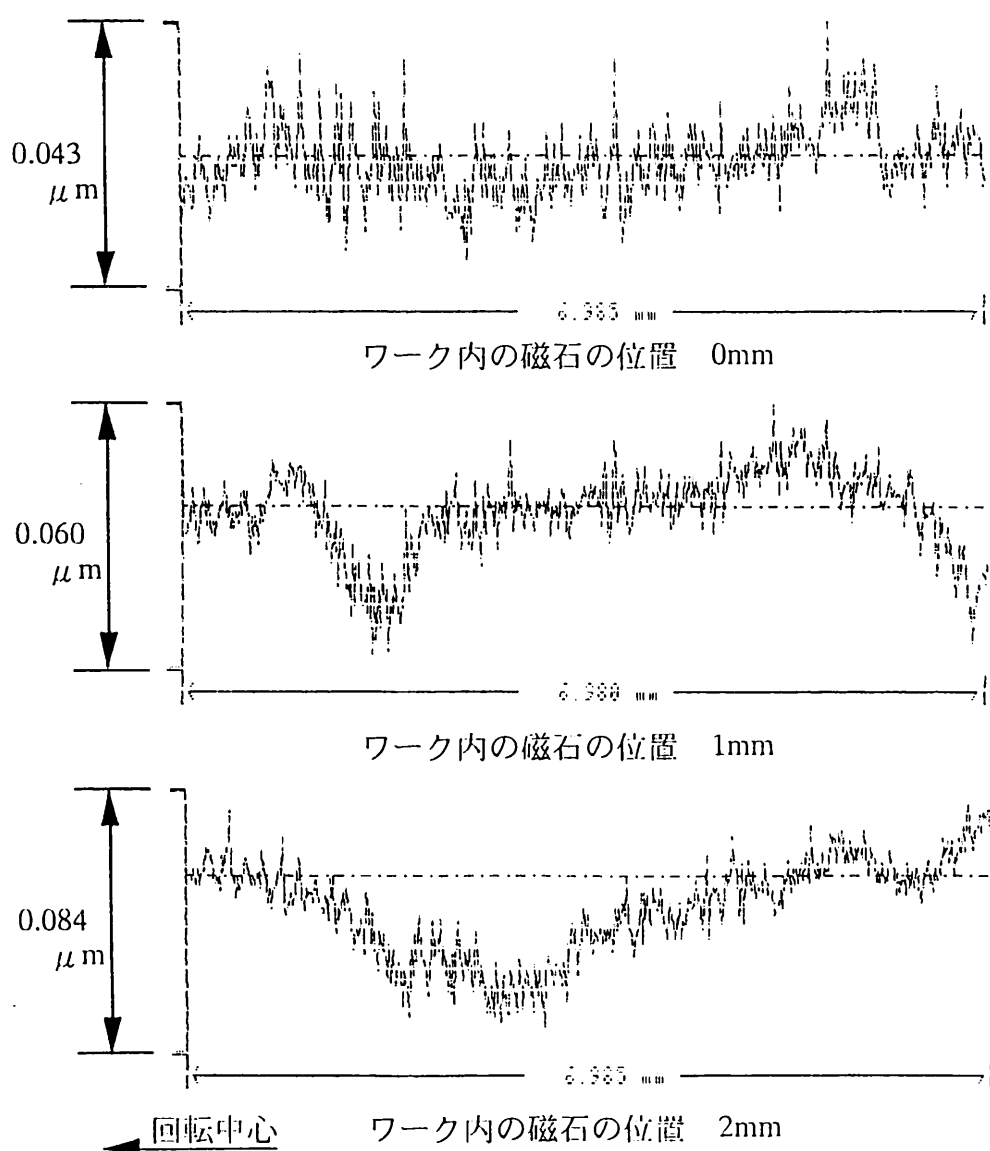


図 5.37 研磨面の断面形状（ワーク軸内の磁石の位置）

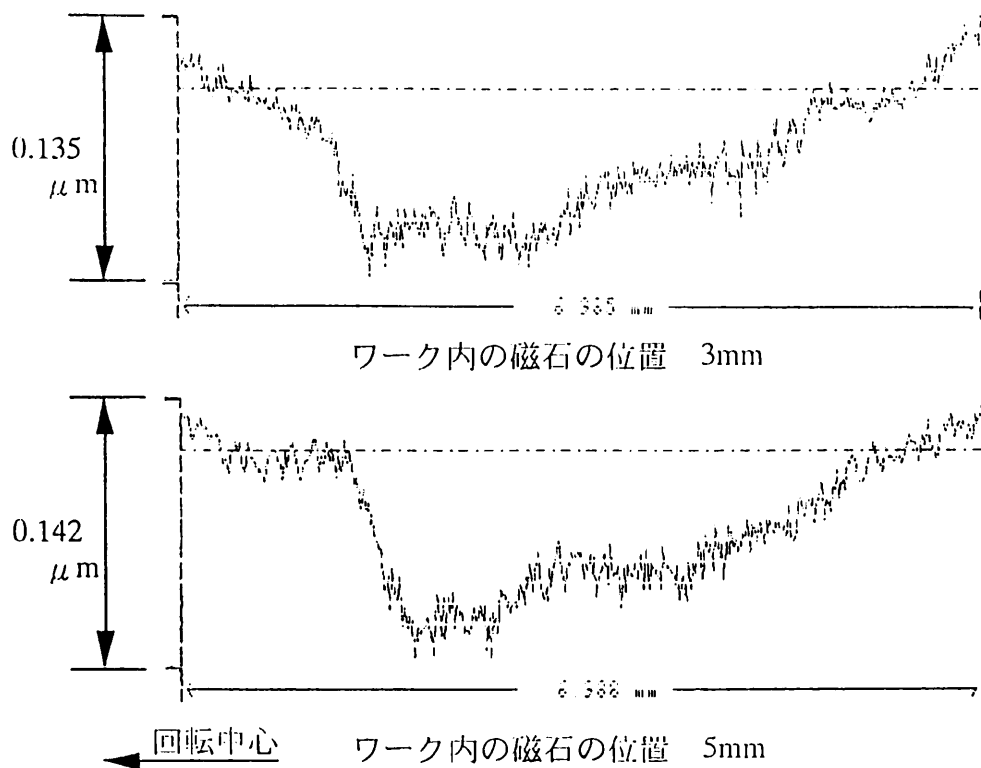


図 5.37 研磨面の断面形状（ワーク軸内の磁石の位置）

い。しかしながら、磁場の変化に伴う形での形状の変化は特には見られなかった。

図 5.38 に、表面粗さの測定結果をしめす。図 5.38 から、磁石が試料から離れるにつれて表面粗さ、特に R_y の値が大きくなっていく様子がわかる。本実験結果に関しても、5.3.1 項に記した考え方が適用できるものと思われる。

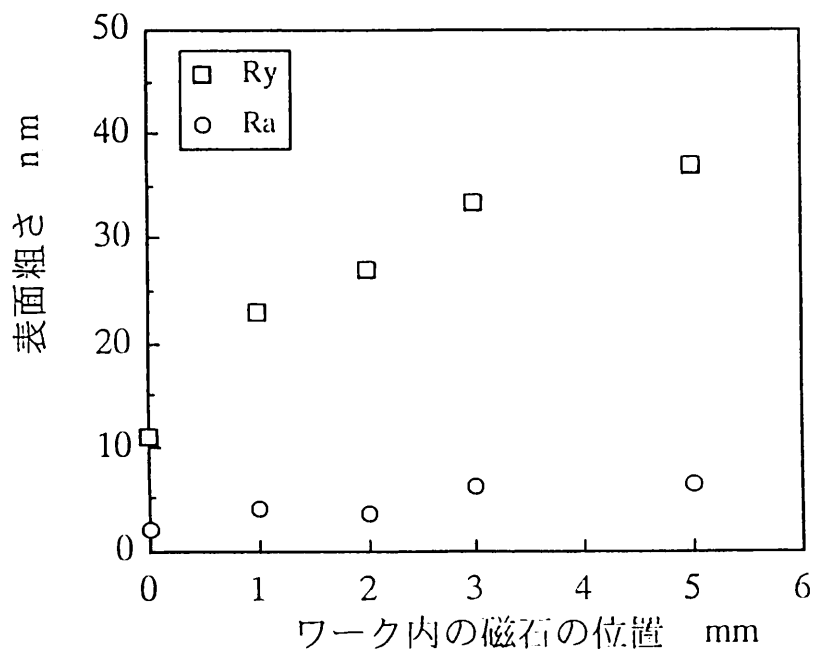


図 5.38 ワーク内の磁石の位置と表面粗さの関係

5.3.3 クリアランスと送り速度の影響

前項までの実験では、送り速度を一定としているため、試料の回転中心にポリシャが近づくほど加工量が増加するという結果が得られた。ここでは、このような現象を避けるために、すなわちどの場所においても一様な研磨が行なえるように、クリアランスと送りの速度を変化させて実験を行った。

クリアランスの制御は、ワーク軸を傾けることによっておこなった。研磨半径が2mmの位置で20または15 μm と設定し、研磨半径が6mmの位置になるときに10 μm になるようにリニアに減少するようにして実験を行った。またさらに、送り速度の制御は、研磨半径が2mmの位置で15 $\mu\text{m/s}$ に設定し、研磨半径が6mmの位置で5 $\mu\text{m/s}$ になるようにリニアに減少するようにした。実験は、ワーク軸内の磁石の位置を2mm、5mmとそれぞれし、研磨回数を3回として平面研磨加工を行った。

図 5.39 に、クリアランスを制御した場合の断面形状を示す。図 5.39 から、すべての断面形状について、回転中心から離れるにつれて加工が十分行われていく様子

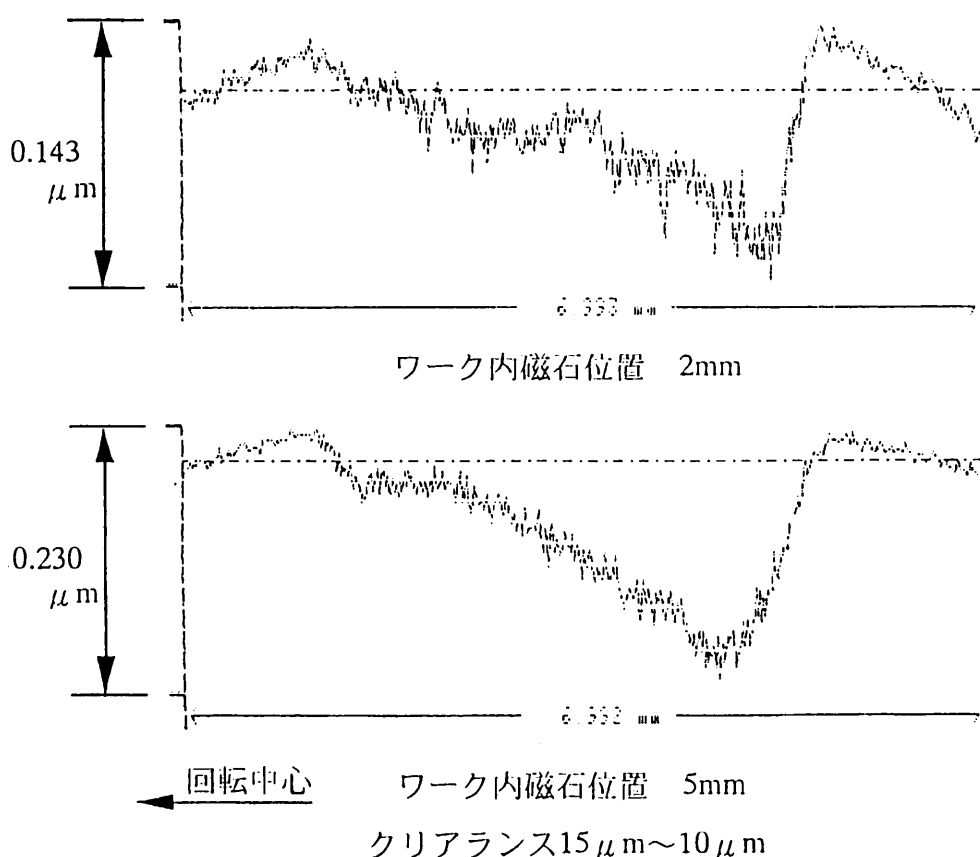


図 5.39 研磨面の断面形状（クリアランス制御）

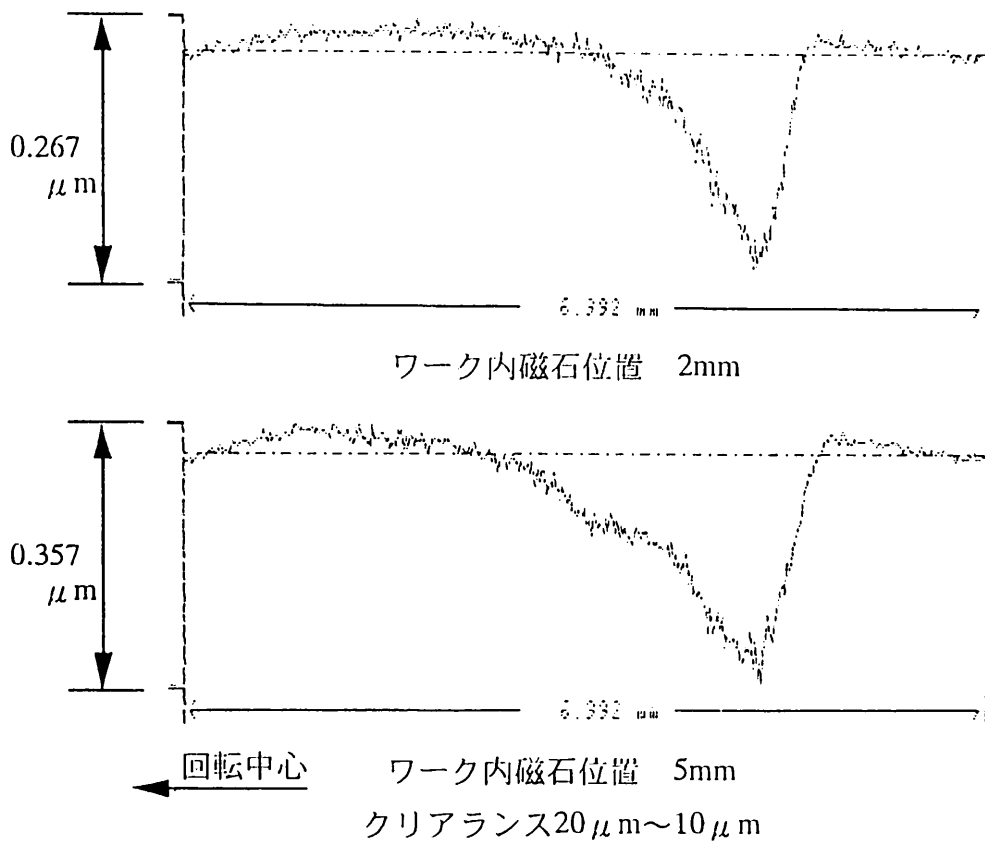


図 5.39 研磨面の断面形状（クリアランス制御）

がわかる。また、ワーク軸内の磁石が試料裏面から離れる方が加工量が大きく、特に、クリアランスを $20 \sim 10 \mu\text{m}$ に制御した場合よりも、 $15 \sim 10 \mu\text{m}$ に制御した場合の方が一様に加工が行われることがうかがえる。しかし、完全な平面は得られていない。これは、実験装置の精度に問題があるのではないかと考えられる。高精度なNC工作機械を用い、クリアランスを適切に制御すれば、一様に研磨された面（平面）が得られるものと思われる。

図 5.40 に送り速度を制御した時の断面形状を示す。図 5.40 から、クリアランスを制御したときよりも、送り幅全体で加工が一様に行われている様子がわかる。しかし、ワーク軸内の磁石が試料裏面に近い場合には、回転中心から離れた場所が幾分多めに加工されている。これは、磁場の影響によるものであると考えられる。5.2.5項で述べた研磨半径の影響について調べた実験結果の場合と同様に、水ベース磁性流体を用い、ワーク内磁石の位置が試料裏面に近い場合には、加工点が回転中心から離れるほど磁場の影響が弱くなる。このため、加工が行われ易いと考えられるからである。

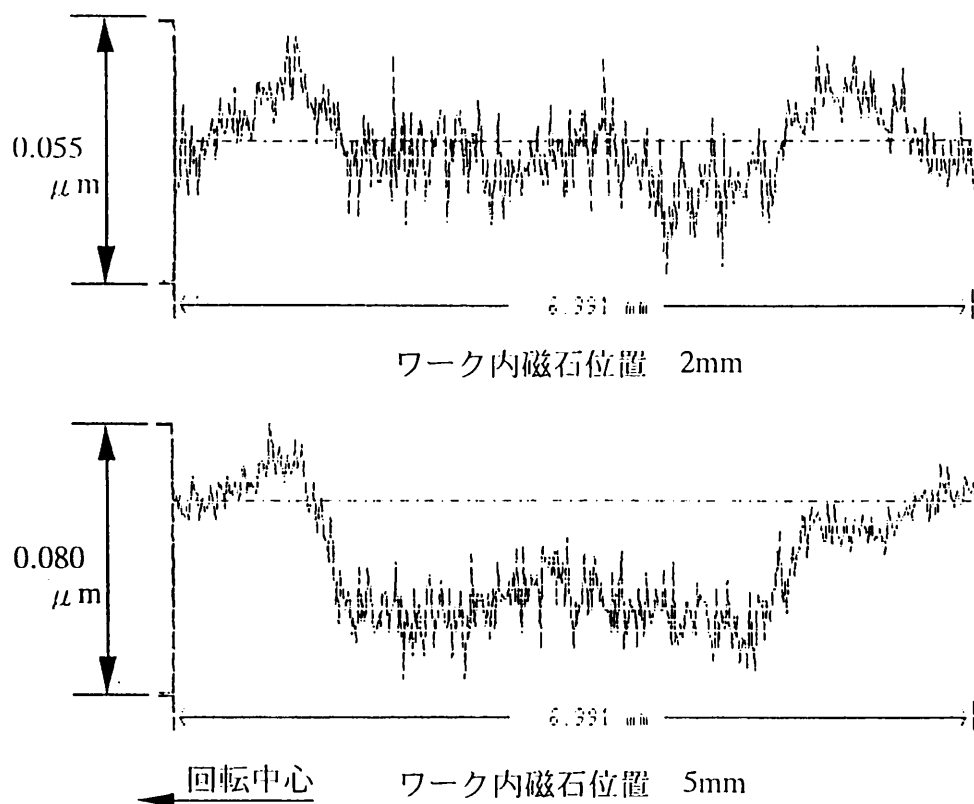


図 5.40 研磨面の断面形状（送り速度制御）

5.3.4 砥粒径の影響

図 5.41 に、砥粒径と表面粗さの関係について示す。実験は水ベース磁性流体を用い、研磨回数をそれぞれ 3 回として行った。また、砥粒は 0.3 , 1.0 , $3.0 \mu\text{m}$ の粒径のものを用いた。図 5.41 から、面創成の場合においても、溝研磨のときと同様に、研磨面の表面粗さは砥粒径に依存することがわかる。この表面粗さの値は、溝研磨加工の場合の値に比べて幾分小さい。これは溝研磨加工の場合、加工量が多い分うねりが生じたためと考えられる。

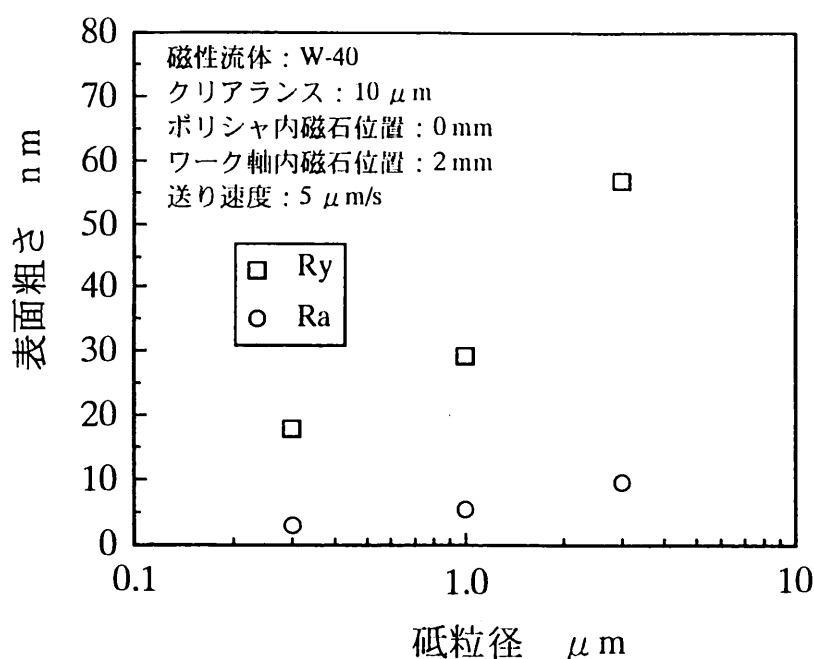


図 5.41 砥粒径と表面粗さの関係

5.3.5 S E M (Scanning Electron Microscope) による加工面の観察

S E M 観察を行うことにより、磁性スラリー内の砥粒が試料表面の創成に如何なる影響を及ぼしているのかを検討した。図 5.42 に S E M による観察写真を示す。観察に供した試料は、粒径 $1.0 \mu\text{m}$ の砥粒を用いて、研磨回数を 3 回として平面加工を施したものである。

図 5.42 (a) は、1000 倍の倍率で観察したものである。面は良好に加工されているが、加工痕の中に大きな傷が存在する様子がわかる。傷の幅から考えると、凝集によって大きくなった砥粒の作用が原因ではないかと思われる。その傷を 10000 倍の倍率で観察した写真が図 5.42 (b) である。図から、傷の淵やその近傍では、微視的な脆性破壊が起こって面が創成された様子が伺える。試料表面の所々で微小なへき開破壊が生じている様子が観察される。これは、クリアランスもより大きな砥粒が、ポリシャの回転エネルギーを直接受けて、試料面に衝突することにより生じたものと考えられる。図 5.42 (c) は、(a) 内の良好な場所を 5000 倍の倍率で観察したものである。図から、加工痕は一様な方向に向いているのがわかる。その加工形態は塑性変形的なものである。そして、(b) の観察写真内に見られたようなへき開破壊面は見られない。これは、砥粒が水平に近い角度で試料表面に作用している

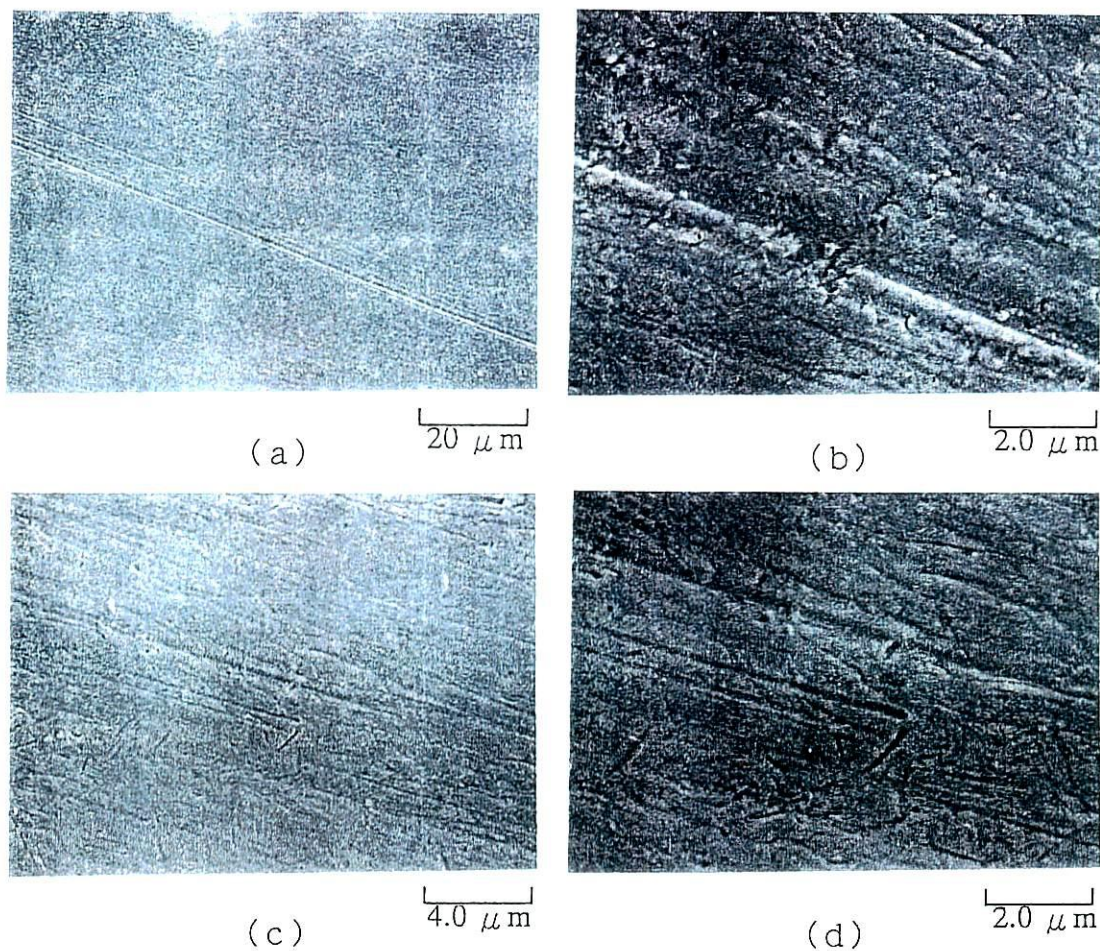


図 5.42 S E M観察写真

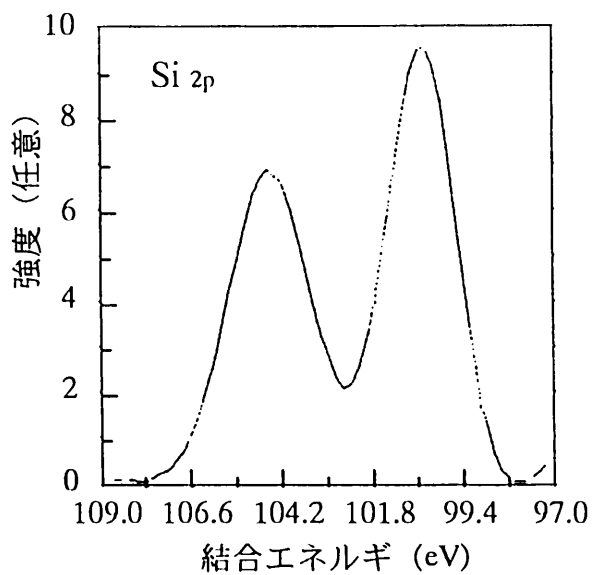
ためと考えられる．さらに倍率を上げて観察したものが図 5.42 (d) である．写真中央にみられる加工痕には変わった痕跡が見られる．それは筋状の加工痕であり，途切れたり終端には窪みを有していたりする．これは，加工を行っている最中に砥粒の運動エネルギーがなくなったために生じたものと思われる．実際，ポリシャの研磨面が，写真の左から右にかけて移動することを考慮すると，写真左方からきた砥粒が試料表面で一度止まり，その後流体の力で離脱していったものと考えられる．

この S E M 観察から，磁性スラリー内の砥粒は水平に近い角度で加工面に作用（切削作用）していることが観察された．また，砥粒の凝集は加工表面に悪影響を及ぼすことがわかった．

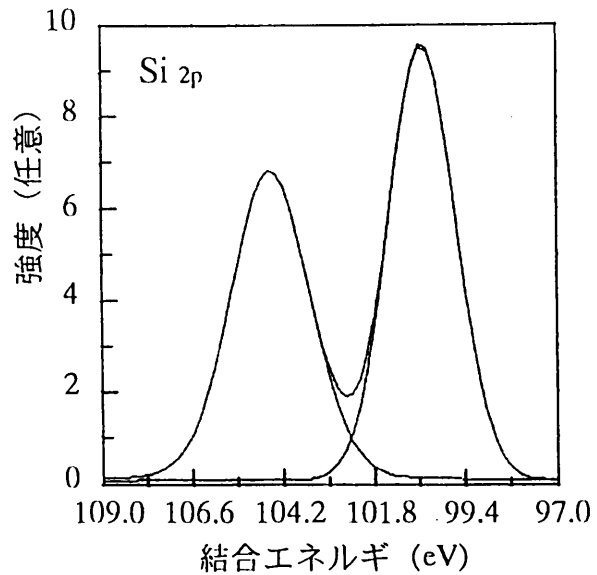
5.3.6 ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) による表面分析

本実験装置によって研磨された試料の表面性状がどのようなものであるかを調べるため、ESCA を用いて表面分析を行った。加工試料表面に存在する砥粒の状態を調べるために、主にアルミナ砥粒の主成分であるアルミニウム原子のスペクトルに注目した。また、シリコンウエハの主成分であるケイ素のスペクトルも検知した。そして、それらの相対量を算出し、研磨機構の考察に資した。表面分析に供した試料は、粒径 $1.0\ \mu\text{m}$ 及び $3.0\ \mu\text{m}$ の砥粒を用い平面研磨を行ったものである。研磨回数は3回とした。実験後、試料を超音波洗浄機内で約5分間アセトン洗浄した。研磨加工したシリコンウエハ表面のSi原子とAl原子スペクトルの拡大図を図 5.43 に示す。また、専用ソフトを用いて求めた各スペクトルのフィットモデルを図 5.43 に示す。表 5.2 に、フィットモデルの面積比に、補正係数（原子感度係数）をかけて算出した Al 原子の Si 原子（Si の主鎖成分）に対する相対量を示す。

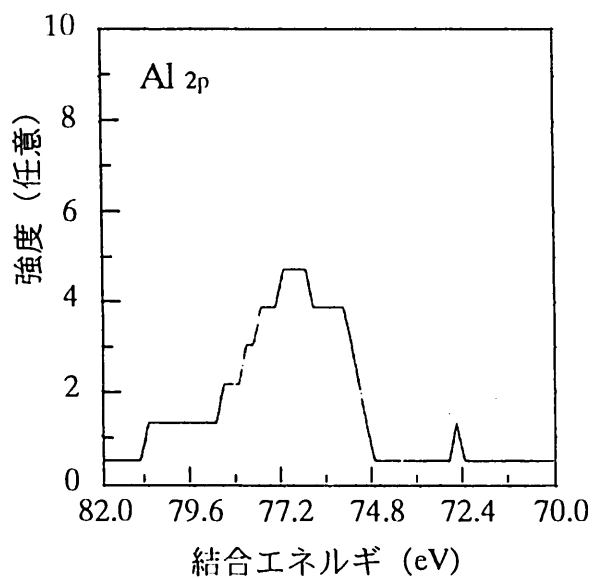
表 5.2 から、使用する砥粒径の大小に関わらず、ウエハ表面にはケイ素原子の数の約4パーセントの量のアルミニウム原子が存在することがわかる。実際、酸化アルミニウム分子は2個のアルミニウム原子を含むので、酸化アルミニウム分子の数はケイ素原子の数の100分の2程度となる。 $3.0\ \mu\text{m}$ の粒径を用いた場合には、実際、加工は良好に行われていることからみて、砥粒がシリコンウエハ表面に激しく衝突し、表面直下に入り込み易かったのではないかと推測されたが、ESCA の測定結果を見ると、そのような結果は外れていることがわかった。しかしながら、表面分析の結果から、超音波洗浄して測定に供しているにも関わらず、研磨したシリコンウエハ表面には微量ではあるがアルミナ砥粒が存在することがわかった。



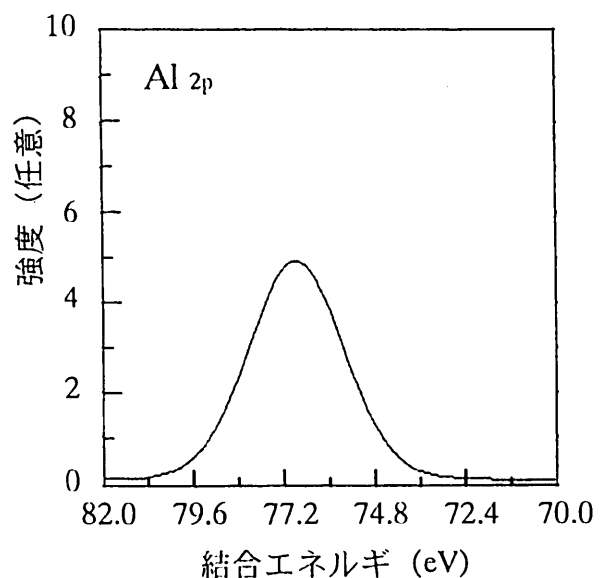
Siスペクトルの拡大図



Siスペクトルのフィットモデル

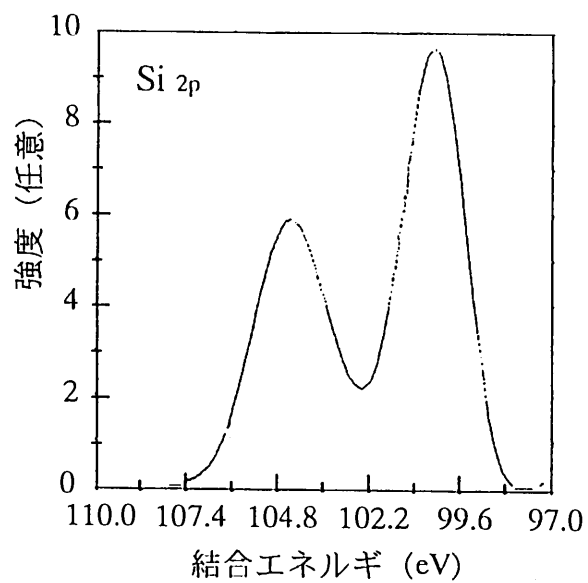


Alスペクトルの拡大図

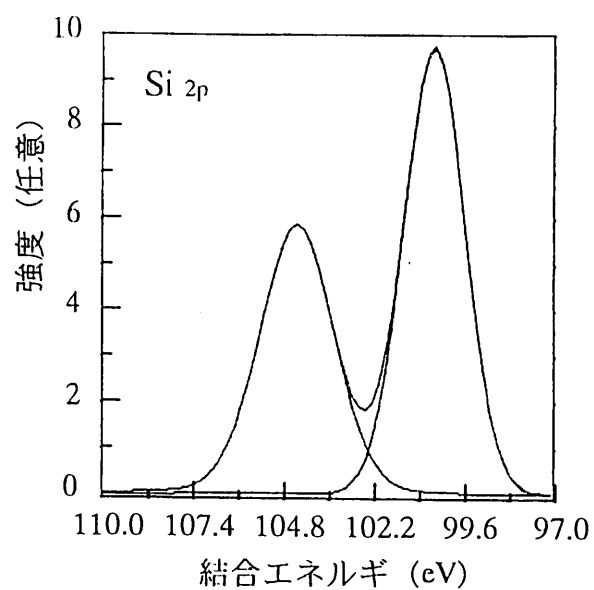


Alスペクトルのフィットモデル

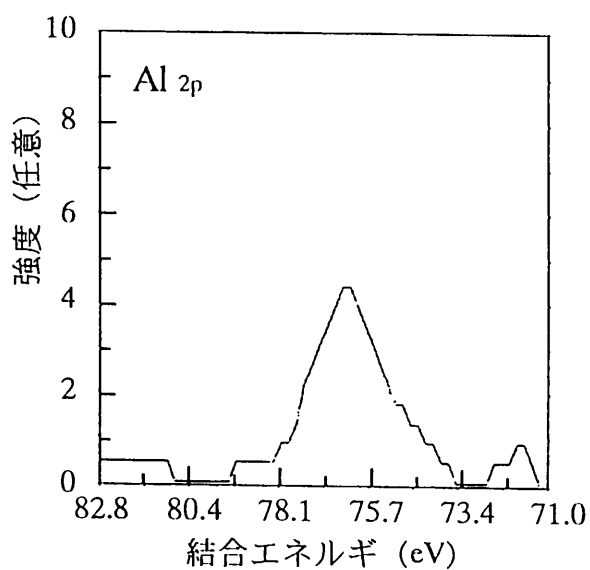
図 5.43 Si, Alスペクトルの拡大図 (粒径 $1.0\mu\text{m}$)



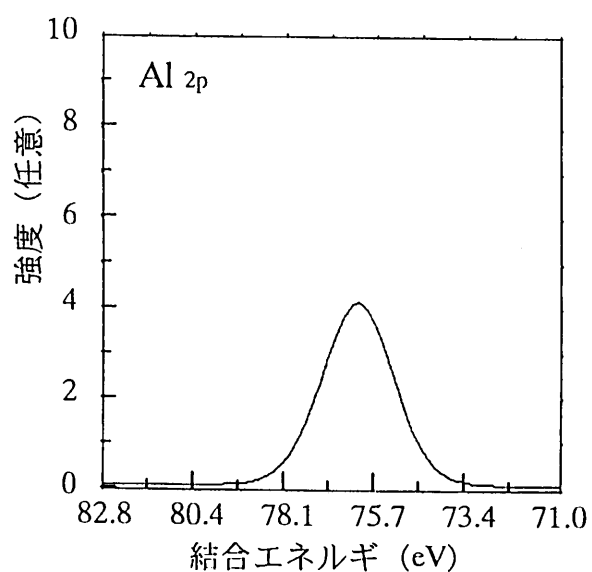
Siスペクトルの拡大図



Siスペクトルのフィットモデル



Alスペクトルの拡大図



Alスペクトルのフィットモデル

図 5.43 Si, Alスペクトルの拡大図 (粒径 $3.0\mu\text{m}$)

表 5.2 Al原子の相対量

砥粒径	Al原子 スペクトルの面積	Si原子 スペクトルの面積	原子感度係数 (Al/Si)	Al原子の相対量 (Al/Si)
$1.0\mu\text{m}$	69	2715	17/11	0.039
$3.0\mu\text{m}$	89	3319	17/11	0.041

5.3.7 鏡面創成実験

前項まで、主としてポリシ加工したシリコンウエハの面を研磨して、その研磨特性を調べてきた。しかし、粗面に対して本加工法がどの程度の研磨能力を有するのか検討していない。そこで、砥粒径を 3.0 , 1.0 , $0.3\ \mu\text{m}$ と順次小さくして研磨を行い、その際、創成される研磨面がどの程度の仕上げになるか調べた。加工用の試料面としては、シリコンウエハの裏面（ラッピング面： $R_a=75\ \text{nm}$, $R_y=575\ \text{nm}$ ）を用いた。磁性スラリーは、ケロシンベースの磁性流体を分散媒として使用した。これは、水ベース磁性流体を用いた場合、加工が進むにつれて加工液が次第に蒸発し、遂には加工を行うのが困難になることが予想されたためである。

実験は、磁性スラリーを1回注入するごとに研磨の繰り返し回数を10回として行った。そのときの表面粗さの変化様態を図5.44に示す。また、研磨前、研磨後の試料表面を100倍および1000倍で観察した観察写真を図5.45に示す。

図5.44から、砥粒径を変えてラップ面を研磨していくと、次第に表面粗さが低減していくのがわかる。しかし、粒径 $0.3\ \mu\text{m}$ の砥粒で研磨した場合、その表面粗さは、同一粒径の砥粒でポリシ面を $0.3\ \mu\text{m}$ 砥粒を用いて研磨した場合の値 ($R_a=6\ \text{nm}$, $R_y=40\ \text{nm}$) より3倍大きな値になった。この原因として、研磨面に生じたうねりが影響していると考えられる。図5.45の写真を見ると、ラッピング面は大小の凹凸を

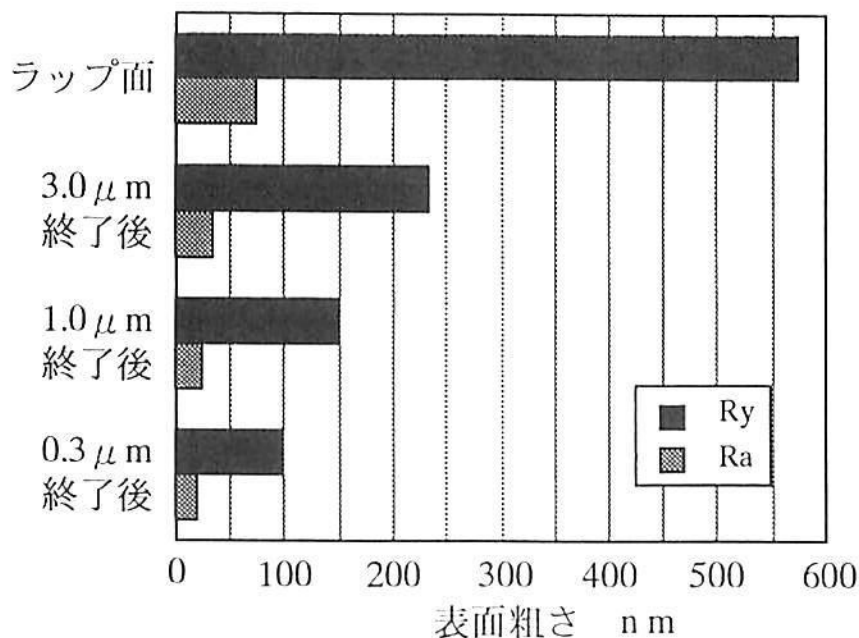


図 5.44 鏡面創成実験による表面粗さ

もつ面となっているが、研磨面は、加工条痕が一方向に配列したような研磨面になっている様子がわかる。しかし、研磨した面は大きなうねりが生じており、うねりの上に良好な研磨面が存在している。子細に見ると、所々にピット状の研磨痕がある。これは、表面のくぼみのところで発生した乱流（渦）が原因して生じたと思われる。表面粗さの値の増大はこれら諸要因が重なって生じたものと思われる。研磨面を1000倍の倍率で観察した写真を見ると、研磨は非常に良好にされている様子がわかる。以上の実験結果から、表面粗さの悪化はうねりやピット状の研磨痕により主としてもたらされたものであらうと考えられる。

この形状精度と表面粗さの低下の要因には、研磨装置の精度が悪いということも挙げられる。高精度な研削加工機を用いれば、より高精度で高能率な研磨が行えると期待できる。

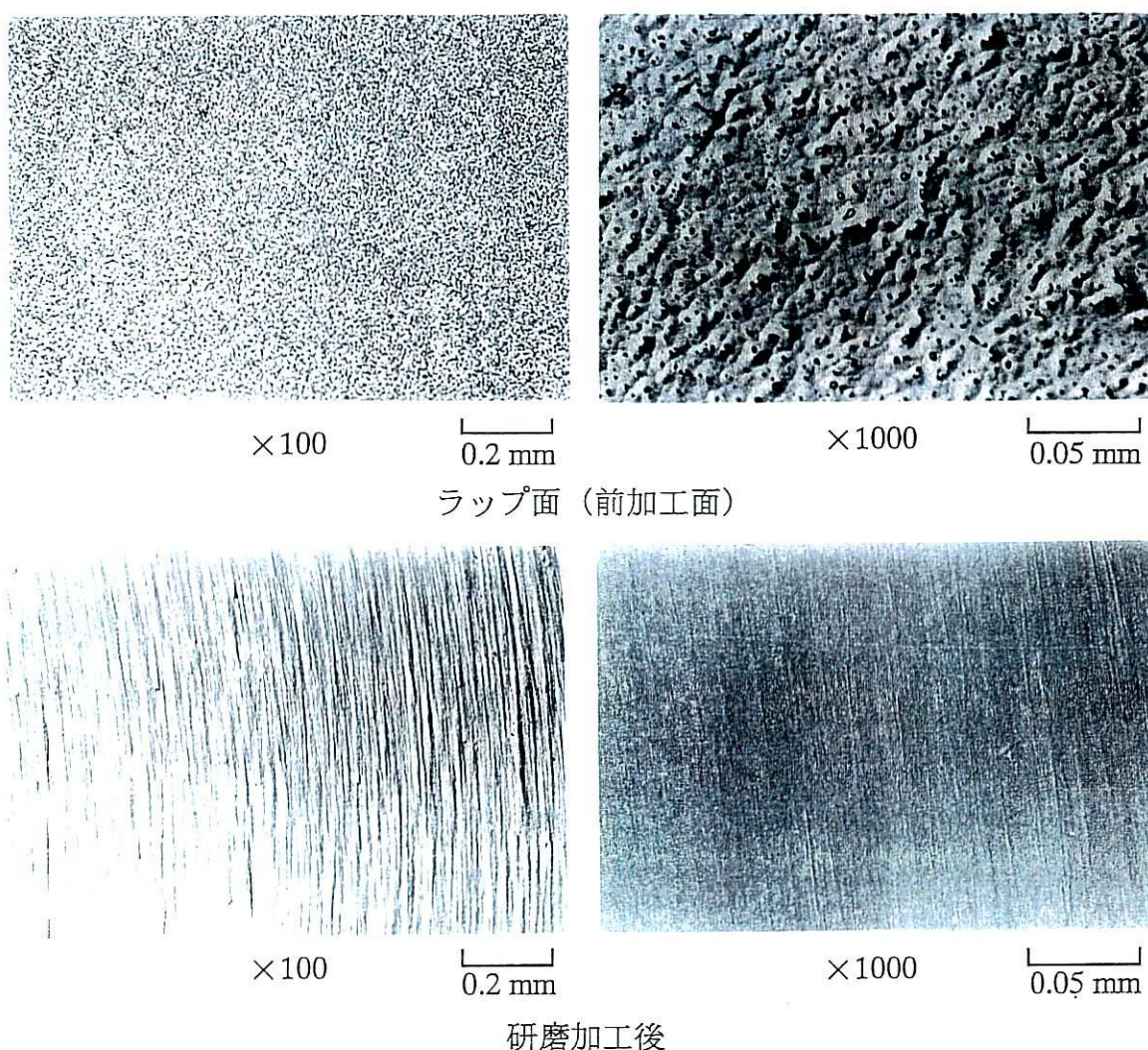


図 5.45 加工面の観察写真（鏡面創成実験）

5.4 本章のまとめ

硬ぜい性材料の最終仕上げ加工に適用するための磁性スラリーを利用した加工法を提唱した。そして、その可能性について評価および検討を行うため、黄銅製の研削砥石型ポリシャとワーク軸に永久磁石を内蔵した研磨装置を試作し、シリコンウエハの研磨実験を行って以下のような結果を得た。

- (1) 試作した研磨装置は、永久磁石の磁気力によりポリシャに磁性スラリーの保持が可能で、加工液を溜める研磨槽が必要でないことが確認された。
- (2) 加工能率は、加工時間及びポリシャの回転数に比例して増加する。
- (3) 加工能率は、ポリシャと加工試料のクリアランスが小さいほど高く、クリアランスが一定以上になると急激に低下する。
- (3) 研磨半径が大きくなると研磨溝深さが減少する。しかし、研磨半径が大きくなると磁場強度の影響を受けにくく、むしろ加工能率は大きくなる。
- (4) 磁性スラリーの溶媒（磁性流体）の種類により加工能率は大きく異なる。
水ベース磁性流体は特異な性質を持つため、水ベース磁性流体を除けば、加工能率は磁性流体の粘度に依存し、粘度が小さいほど加工能率は大きい。
- (5) 加工点付近の磁場が変わると加工能率が変化する。その変化の様態は、使用する磁性流体によって異なる。ポリシャとワーク軸内の磁石の位置の兼ね合いにより、ワーク軸内の磁石を取り外した時の加工量を上回る場合があることが確認された。
- (6) 加工面の表面粗さは、基本的には使用する砥粒径に依存し、微細な砥粒を使用すれば、ナノメートルオーダーの表面粗さを得ることが可能である。また、試料のラッピング面を研磨加工した場合にも、ポリシ面を研磨したときと同様、良好な加工面が得られる。
- (7) 基本的に研磨の加工形態は、砥粒による微小な切削作用により行われている。砥粒径が大きくなると加工形態は変化し、仕上げ面の表面粗さの値は大きくなる。
- (8) 加工後のシリコンウエハ表面には微量ではあるがアルミナ砥粒が存在している。

第6章 カップ形ポリシャ方式研磨装置の研磨特性

6.1 はじめに

前章に記した平形ポリシャ方式の研磨装置は、2軸回転系より構成されているため、球面または非球面レンズのような点対称な被加工物の研磨に適用可能であろうと考えられる。しかし、研磨作用が営まれる領域は、円盤状のポリシャと加工物が一番近くなる一点でしかないという難点がある。また、加工物の回転中心で研磨量が最も多く、それから離れるにつれて少なくなるという問題も内包している。そのため、平形ポリシャ方式の研磨装置を用いて、平面を研磨創成することは幾分困難であると感じられた。

したがって本章では、永久磁石をカップ形のポリシャ内に組み込んだ、研削加工型の新しい平面研磨装置を新しく開発した。本装置は、カップ形ポリシャの端面で平面を研磨することにより、効率よく平面を創成するものである。本研磨装置は、平形ポリシャ方式研磨装置同様、磁性流体を利用した研削加工と研磨加工の一体化を計った加工装置であり、精度のみならず加工プロセスをも短縮し得る可能性を秘めている。

6.2 実験装置および実験方法

研磨実験装置の概略図を図 6.1 に示す。装置は、カップ形砥石を用いたテーブル往復型の平面研削盤のような構造になっている。主軸端にはカップ形砥石状の黄銅製ポリシャが取り付けられている。ポリシャの回転駆動力は、装置右方のモータにより、プーリとタイミングベルトを介し伝達される。ポリシャ内部には円形のネオジ磁石 (Nd-Fe-B) が組み込まれており、ポリシャ外周の亚克力製ガイドによって、磁性流体が常にポリシャ下面に磁着するようになっている。加工試料はポリシ加工した $20 \times 50 \times 0.6\text{mm}$ の Si ウエハを用い、X、Y ステージ上に取り付けられた試料台の上に治具によって固定される。ポリシャと加工試料の隙間 (クリアランス) は、Z ステージのマイクロメータによって設定した。加工液には、磁性流体 (タイ

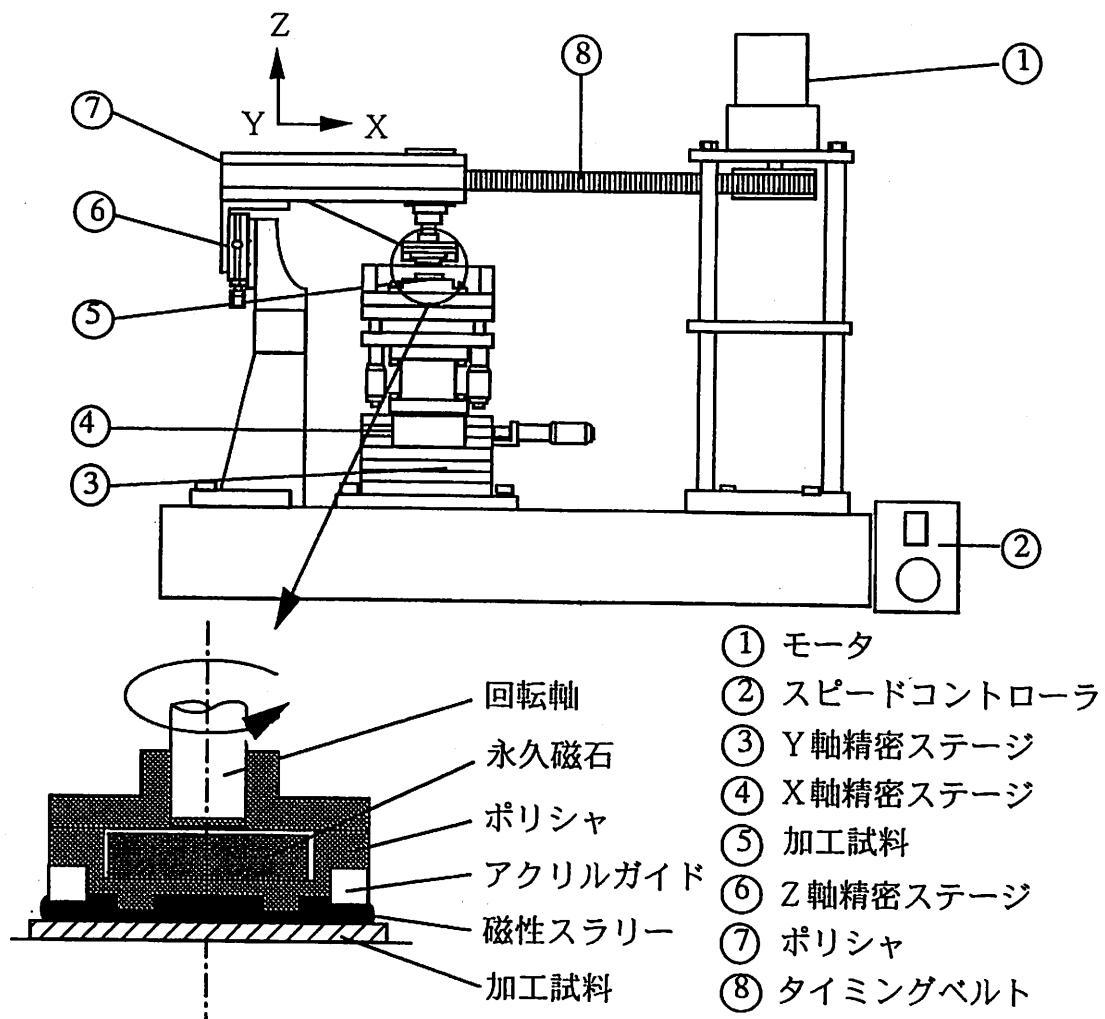


図 6.1 研磨加工実験装置の概観

ホー工業，フェリコロイド) に Al_2O_3 砥粒を 3 vol% 混入したものを使用し，1 回の研磨毎に 2 ml ポリシャの下面に磁着させた．ポリシャは研磨部が平坦で，外径が 24mm で内径が 14mm のもの（ポリシャ A），研磨部に R を付け，直径が 27mm（ポリシャ B）のものと 19mm（ポリシャ C）の 3 種類を使用した．永久磁石は円盤状（ $\phi 25 \times t 6\text{mm}$ ，磁石 A）とリング状（ $\phi 26 \times \phi 20 \times t 6\text{mm}$ ， $\phi 18 \times \phi 7 \times t 6\text{mm}$ ）の 3 種類を用い，リング状の磁石はそれぞれ磁石 B，磁石 C とした．ポリシャ

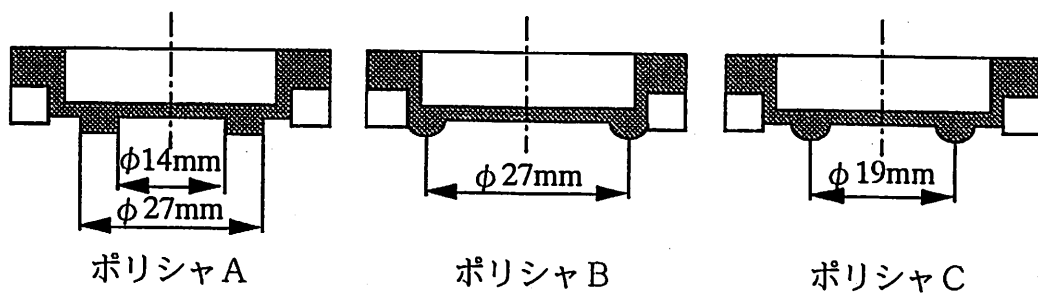


図 6.2 ポリシャの形状

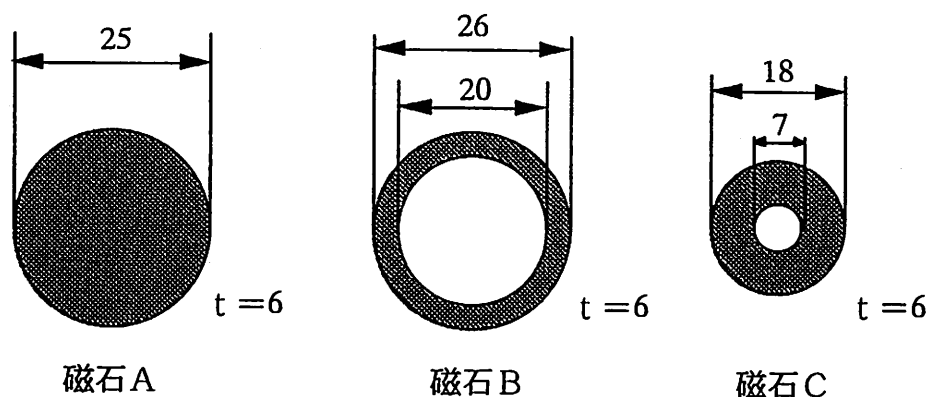


図 6.3 永久磁石の形状

表 6.1 加工条件

加工試料	S i ウエハ 20×50×0.6mm
砥粒	A l ₂ O ₃ 粒径：0.06, 0.3, 1.0, 12.5 μm 砥粒濃度：3 vol %
磁性流体	W-40 (水ベース) HC-50 (ケロシンベース) PA-40 (ポリアルファオレフィンベース) LS-40 (アイコシルナフタリンベース)
永久磁石	Nd-Fe-B 形状：A (φ25×t6) B (φ26×φ20×t6) C (φ18×φ7×t6)
クリアランス	10 μm
研磨時間	60 min
ポリシャ	ポリシャA：平坦, φ19, 回転数 470, 400 rpm ポリシャB：Rつき, φ27 回転数 330 rpm ポリシャC：Rつき, φ19 回転数 470 rpm
送り速度	10 μm/s
送り幅	4 mm

と永久磁石の形状をそれぞれ図 6.2, 図 6.3 に示す。また加工条件を表 6.1 に示す。

研磨実験は大別して、加工試料を水平方向移動を行わずに定位置にて研磨する方法（定位置研磨加工）と、水平方向に移動を行う研磨方法（平面研磨加工）の2種類について行った。そして、ポリシャや永久磁石、磁性流体が研磨特性に如何なる影響を及ぼすかについて検討した。実験後のシリコンウエハの研磨痕は、触針式粗さ計を用い、加工形状、表面粗さの両方について測定を行った。研磨機構について考察を行うため、フロートガラスを研磨してAFM観察した。評価方法の詳細は4.3節で述べた通りである。

6.3 実験結果および考察

6.3.1 定位置研磨加工に関する実験結果と考察

(1) ポリシャAを用いた定位置研磨加工

まず始めに、研磨部が平坦なポリシャ（ポリシャA）を用いて研磨実験を行った。

図 6.4 に、粒径 $12.5\ \mu\text{m}$ の砥粒で研磨した面の断面形状を示す。ポリシャの回転速度を 400, 470rpm と変え、また、磁性流体を水ベースとケロシンベースの 2 種として実験を行った。図 6.4 から、水ベースに比べてケロシンベースの磁性流体は研磨量が少なく、低速回転ではほとんど研磨されてないことがわかる。この原因として、砥粒にかかる磁気力の方向が磁性流体の種類によって異なることが挙げられる。前節の実験結果と同様に、水ベース磁性流体を用いた場合には、砥粒は加工試料向きの排斥力を受けると思われる。これにより、砥粒は加工試料表面に集中し、このため、加工量が大きくなったと考えられる。一方、ケロシンベース磁性流体を用いた場合には、砥粒がポリシャ側に引き寄せられことにより加工量が小さくなったと推察される。

図 6.5 は永久磁石の形状が研磨面の断面形状創成にどのような影響を及ぼすかを

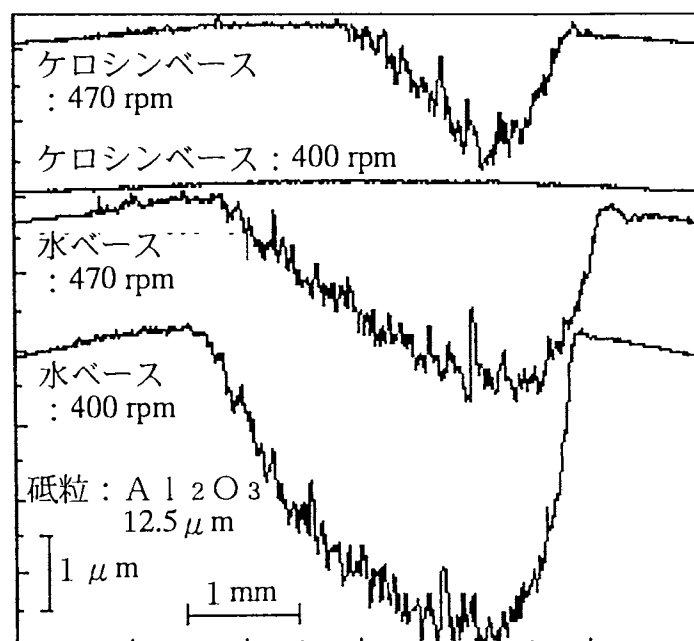
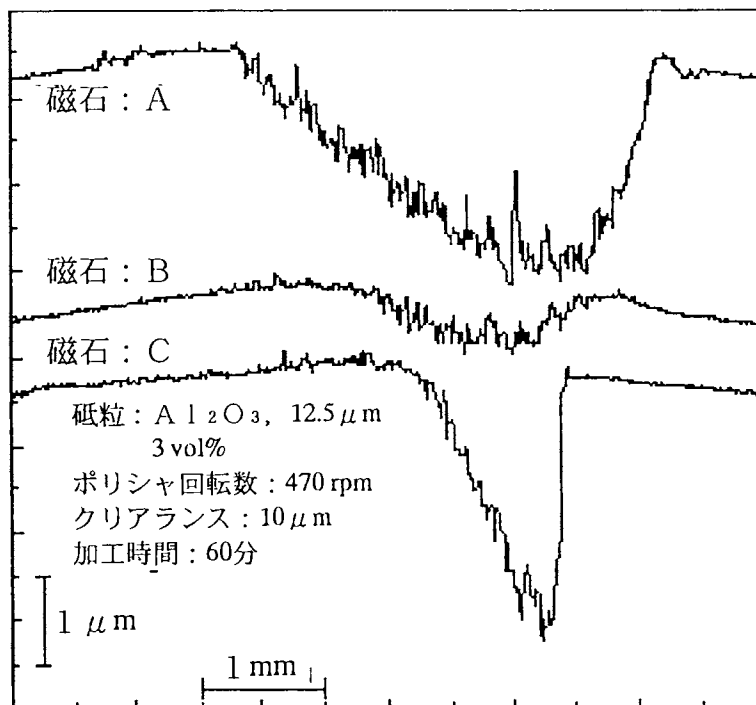
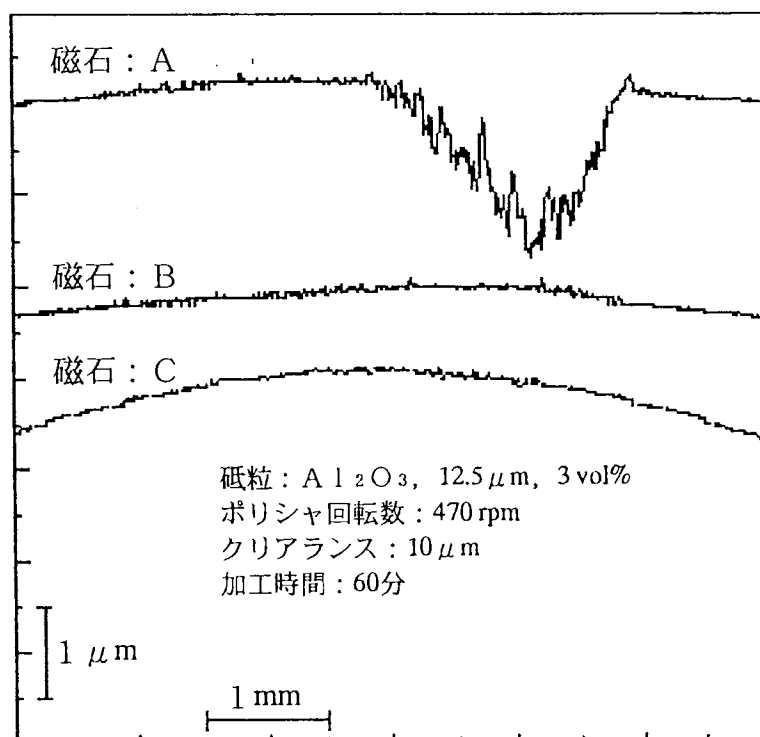


図 6.4 ポリシャ回転速度と研磨面の断面形状

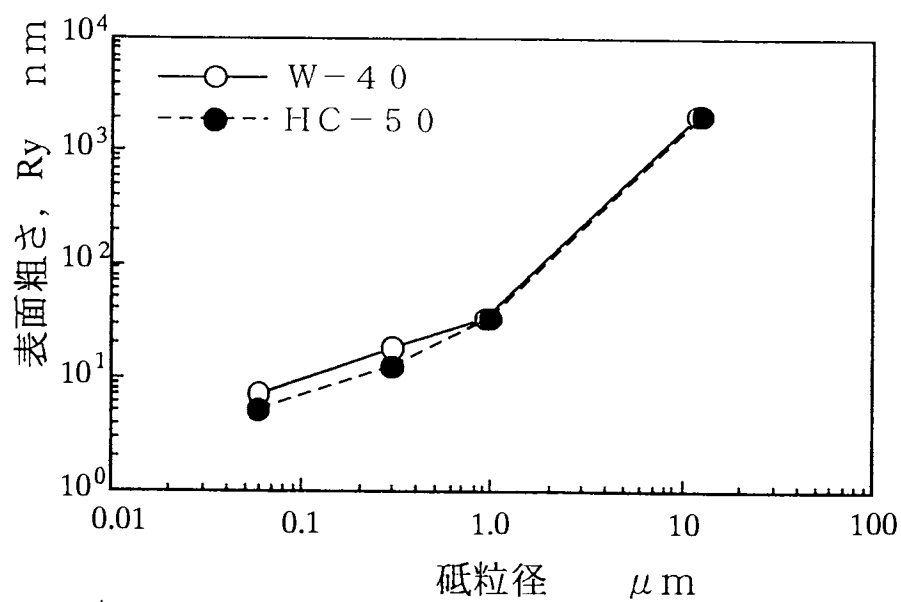


(a) 水ベース磁性流体

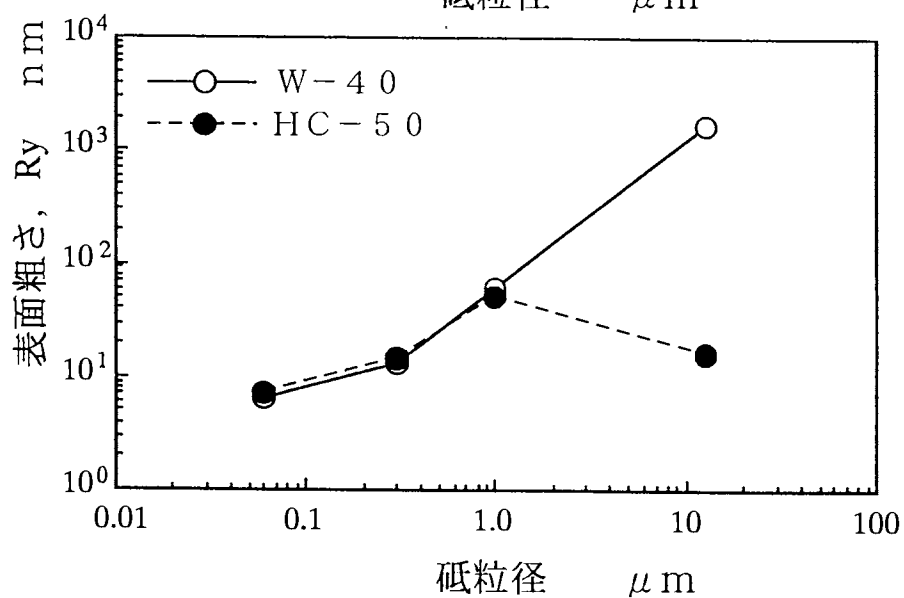


(b) ケロシンベース磁性流体

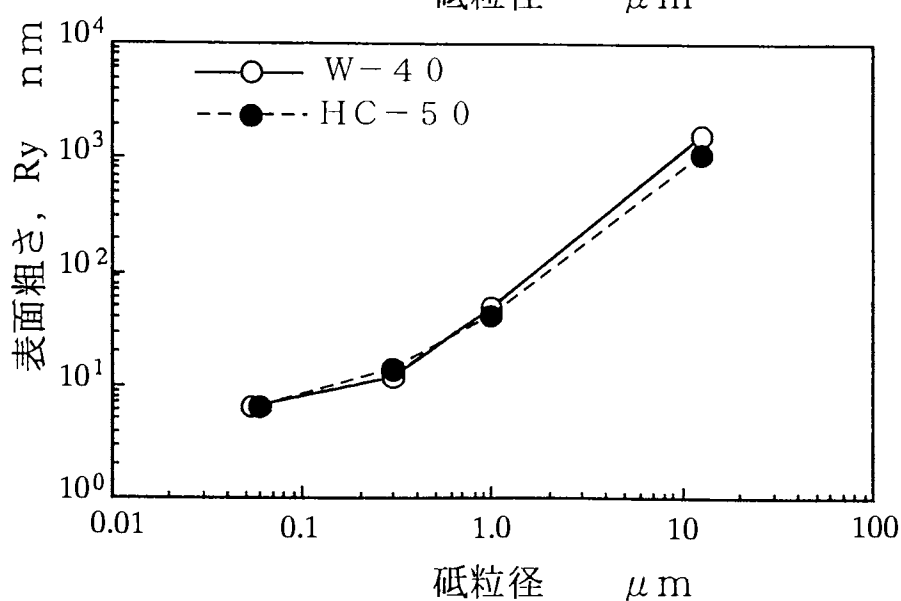
図 6.5 研磨面の断面形状



(a) 磁石A



(b) 磁石B



(c) 磁石C

図 6.6 砥粒径と表面粗さの関係

調べたものである。図 6.4 の場合と同様に、ケロシンベースの磁性流体の方が研磨量が少なくなっている。また、永久磁石の形状を違わせると、研磨作用の進行速度が異なることがわかる。永久磁石の形状から考えて、水ベース磁性流体の場合には、砥粒は磁力が弱いところに集中して、その位置で研磨作用が早く進行したものと推察される。

図 6.6 は、粒径の異なる砥粒を用いて研磨した面の表面粗さを示す。水ベースとケロシンベースの磁性流体の結果を表している。磁石 B を用い、かつ、ケロシンベース磁性流体に粒径 $12.5\ \mu\text{m}$ の砥粒を混入した磁性スラリーを用いた実験の場合には、研磨がほとんどなされなかったもので、その表面粗さは前加工面の表面粗さを表示している。しかし、その点を除けば、表面粗さは砥粒径に依存している様子がわかる。しかしながら、磁性流体の種には依存しない。

図 6.7 に、ポリシャの回転速度の表面粗さに及ぼす影響について調べた結果を示す。実験は、粒径 $1\ \mu\text{m}$ の砥粒を用いて行った。水ベース磁性流体の場合には、ポリシャの回転速度の影響は見受けられないが、ケロシンベースの場合では、低速回転域で、表面粗さは良くなっている。これは、研磨量が少なかったことにも関係していると思われる。

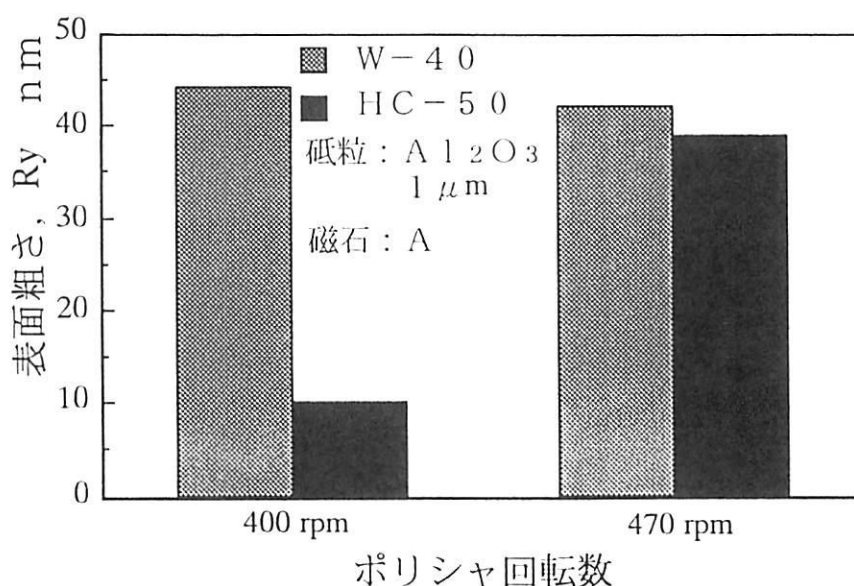
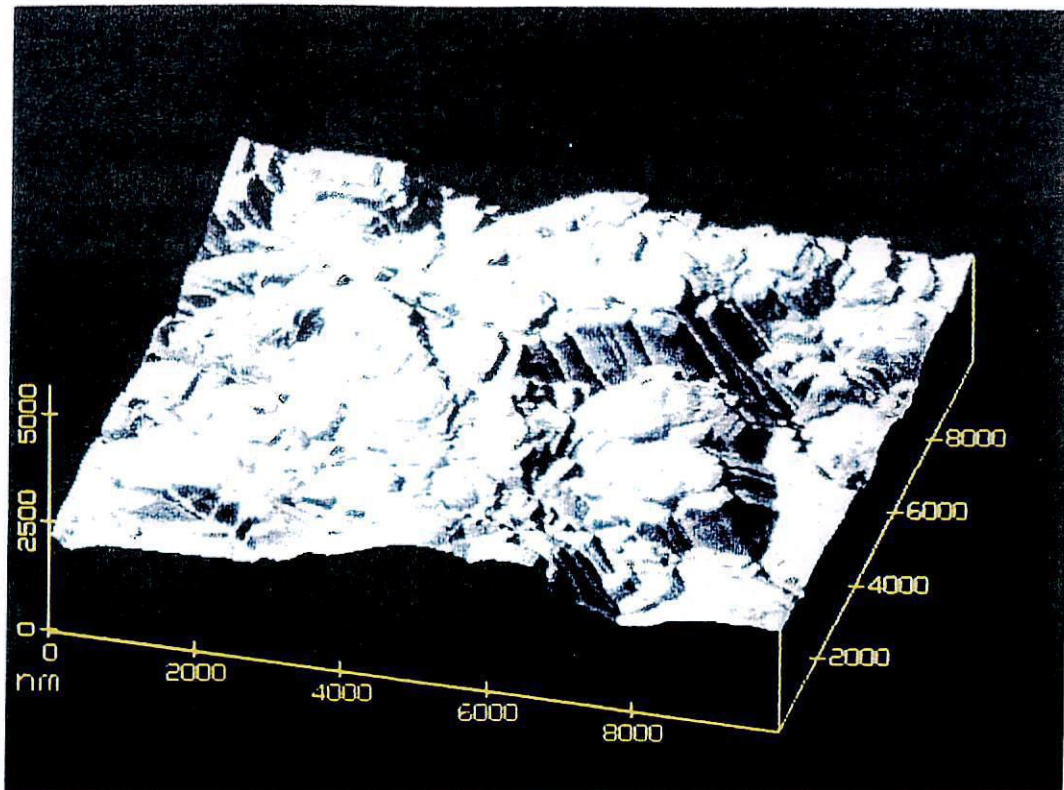
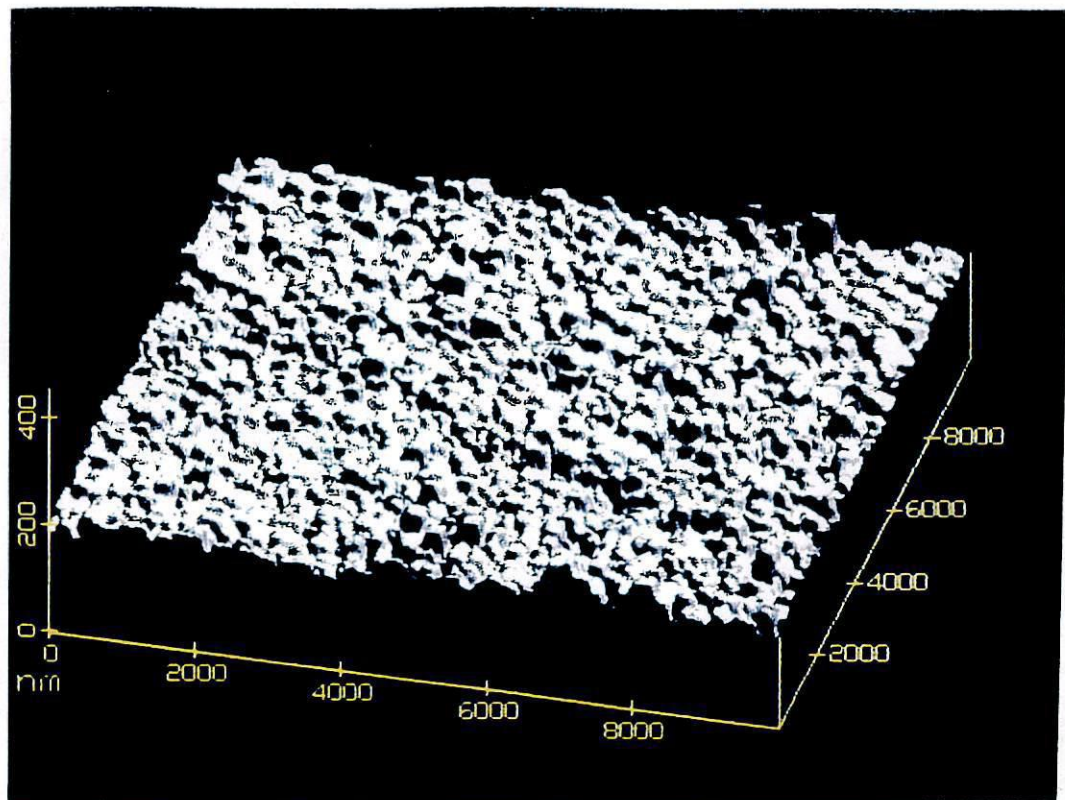


図 6.7 ポリシャ回転数と表面粗さの関係

図 6.8 に、粒径の異なる砥粒を用いて研磨したフロートガラスの A F M 観察像を示す。観察は、 $10\ \mu\text{m}$ 角内で行った。図 6.8 から、 $12.5\ \mu\text{m}$ の粒径の砥粒で研磨した面は、微小なへき開面の連続からなっているように思われる。しかし、 1.0 および

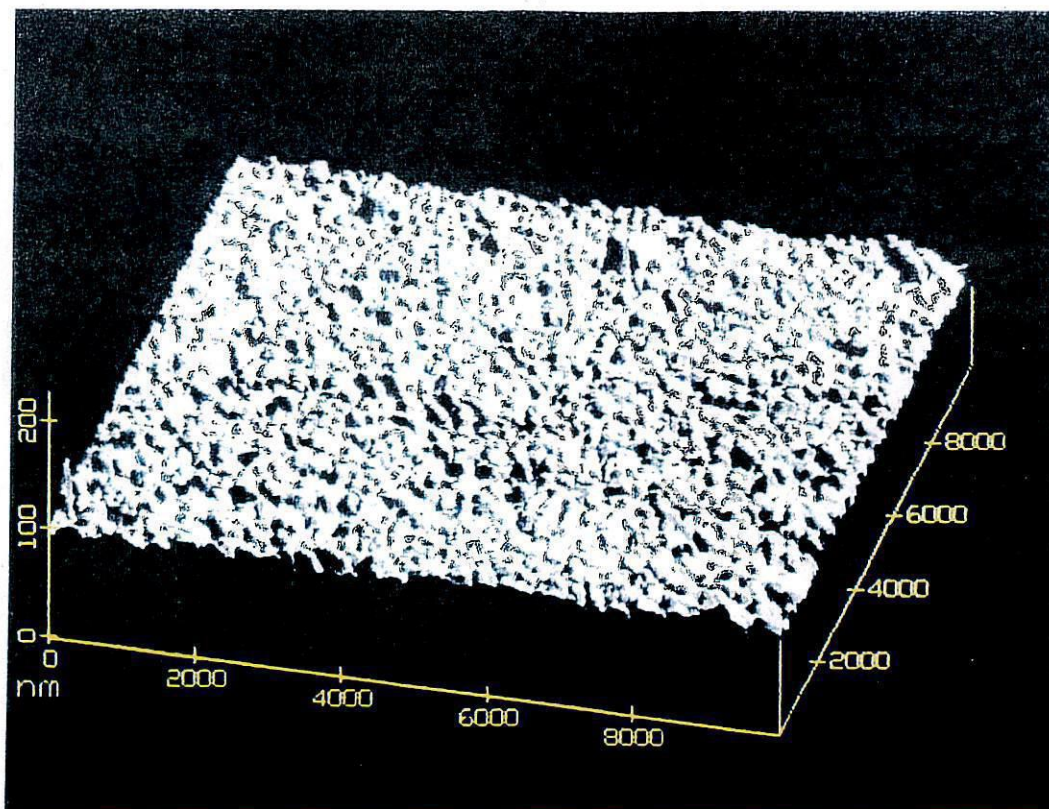


Al_2O_3 ($12.5\ \mu\text{m}$)



Al_2O_3 ($1.0\ \mu\text{m}$)

図 6.8 A F M観察写真



Al_2O_3 ($0.3\ \mu\text{m}$)

図 6.8 A F M 観察写真

$0.3\ \mu\text{m}$ の砥粒の場合は、ピット状の加工痕が無数見られる。平形ポリシャの場合に観察されたような、筋状の加工痕がほとんど見られなかった。このことから、カップ形ポリシャの場合の研磨機構は平形ポリシャの場合とはまったく異なっていることが推量される。無数のピット状の加工痕は、砥粒が転がるというよりは、むしろ直角に近い角度で加工面に衝突して生成するか、もしくは、加工面上にとどまっている砥粒に、ポリシャ近くに飛来する大きなエネルギーをもった砥粒が衝突して創成されたように見られる。研磨に関するこの考え方は、式 3.13 (3.3 節参照) の中の W_d (Deformation Wear) に適用可能かと思われる。

(2) ポリシャ B 及び C を用いた定位置研磨加工

次に研磨部に曲率を設けたポリシャ (ポリシャ B, C) を使用して実験した場合の測定結果を示す。実験では、研磨部の直径はそれぞれのポリシャにより違うため、主軸を一定の回転数で回転すると、それぞれのポリシャの研磨部の周速度が異なっ

たものになるため、主軸の回転数はポリシャの研磨部の周速度が一定になるように設定した。

図 6.9 に、水ベース磁性流体を使用して実験した場合の研磨深さの測定結果を示す。実験では、ポリシャおよび永久磁石を種々組み合わせて、その効果について調べている。図 6.9 から、研磨深さの値はポリシャ B の場合よりもポリシャ C を用いた方が大きい。また、磁石 A よりも磁石 B の場合の方が大きな値となっている様子がわかる。この要因として、永久磁石が作る磁場によって生じる磁性流体内の砥粒分布が影響していると考えられる。砥粒

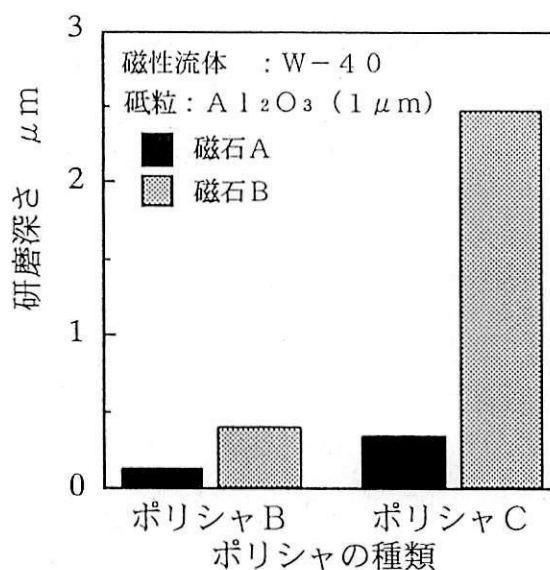
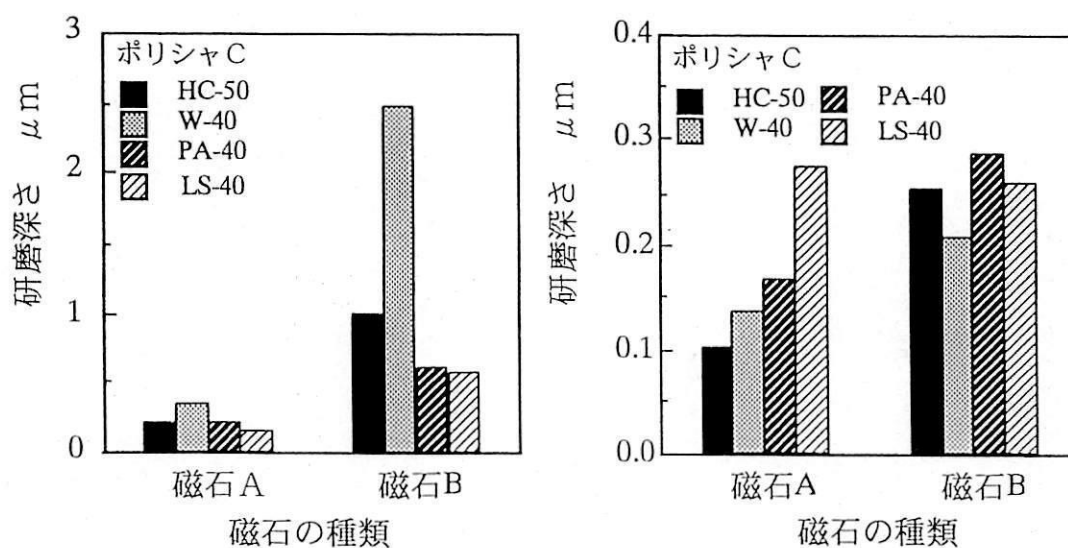


図 6.9 ポリシャおよび永久磁石と研磨痕の関係

に関しては、磁石 A を用いた場合には軸中心部に集中し、磁石 B の場合には磁石の形状に沿った形でリング状に分布すると思われる。砥粒が分布する位置とポリシャの研磨面が一致するとき、研磨深さが最大になると考えられる。

図 6.10 に、研磨深さを比較した結果を示す。図 6.10 は、ポリシャ C を使用して、磁石を A、B と変え、かつ、磁性流体を 4 種類、砥粒径を 2 種類変えて研磨したときの測定結果を示している。図 6.10 から、粒径 $1\ \mu\text{m}$ の砥粒を用いた場合には、表



(a) Al_2O_3 ($1.0\ \mu\text{m}$)

(b) Al_2O_3 ($0.3\ \mu\text{m}$)

図 6.10 磁性流体の種類と研磨深さの関係

6.2 に示す磁性流体の粘度と研磨深さの間には相関がないことがわかる。また、図 6.10 から、磁石 B を用い水ベース磁性流体を使用して実験した場合、研磨深さが著しく大きくなっている様子がわかる。一方、 $0.3\ \mu\text{m}$ の砥粒径の場合には、磁石 A の結

表 6.2 磁性流体の粘度

磁性流体	粘度 (mPa・S, 25℃)
H C - 5 0	22 ± 5
W - 4 0	25 ± 7
P A - 4 0	190 ± 50
L S - 4 0	450 ± 150

果に関して、研磨深さと粘度との間に相関関係があるようにも見られる。しかしながら、研磨深さが小さいことからいって、ほぼ一定の値であるともいえる。

以上の測定結果から、研磨深さに関しては、磁性流体の粘度よりも砥粒と磁性流体との親和性や、磁場に感応する磁性流体の性質が影響を及ぼしているといえる。

図 6.11 は、図 6.10 の研磨面に関して表面粗さの値を比較した結果を示している。図 6.11 から、砥粒径が $1.0\ \mu\text{m}$ の場合には、表面粗さは約 40nmRy 前後ではほぼ一定値を示していることがわかる。また、砥粒径が $0.3\ \mu\text{m}$ の場合には、 25nmRy でほぼ一定値を示している。これらの測定結果から、研磨面の表面粗さは磁場強度や磁性流体の種類の影響を受けず、使用する砥粒径にのみ依存することがわかる。

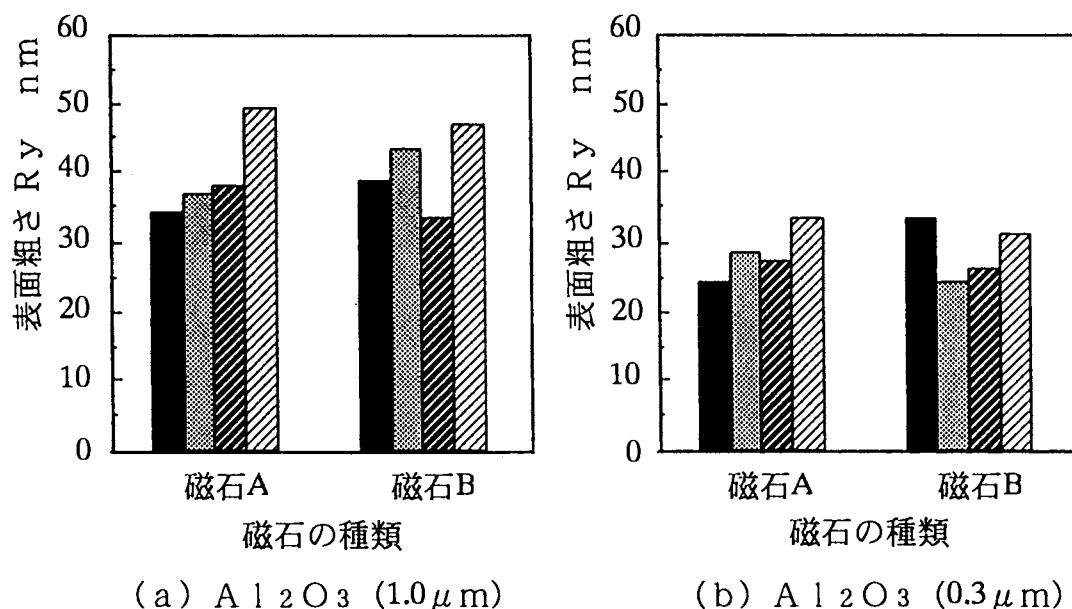
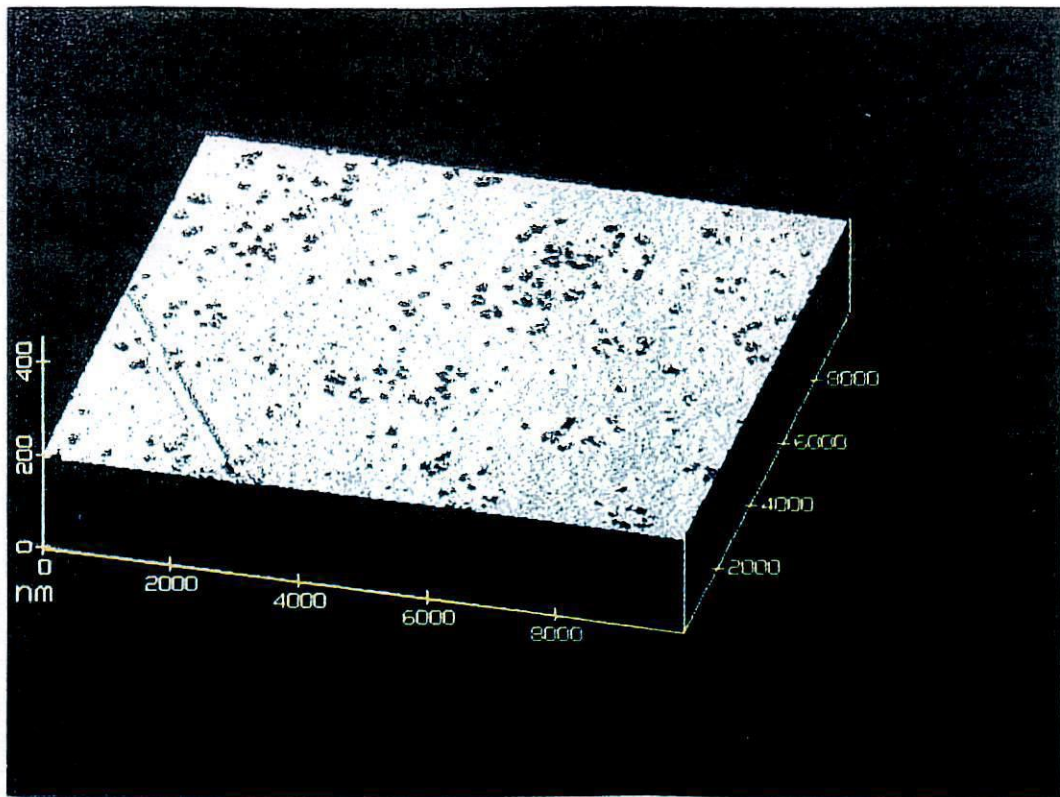
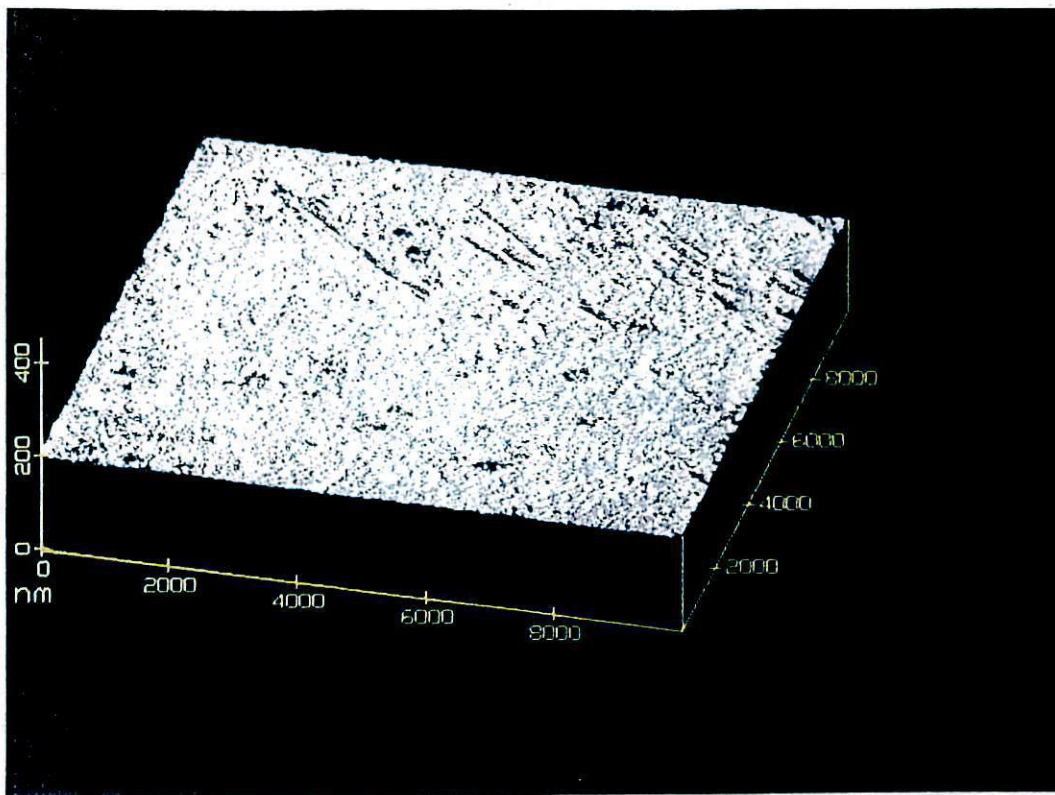


図 6.11 磁性流体の種類と表面粗さの関係

図 6.12 に、研磨を行う前のものと、粒径の異なる 3 種類の砥粒 (0.06 , 0.3 , $1.0\ \mu\text{m}$) を用いて研磨したフロートガラスの AFM 像を示している。研磨は、ポリシャ B を用い、永久磁石として A を使用して行った。フロートガラスは、その製造の段

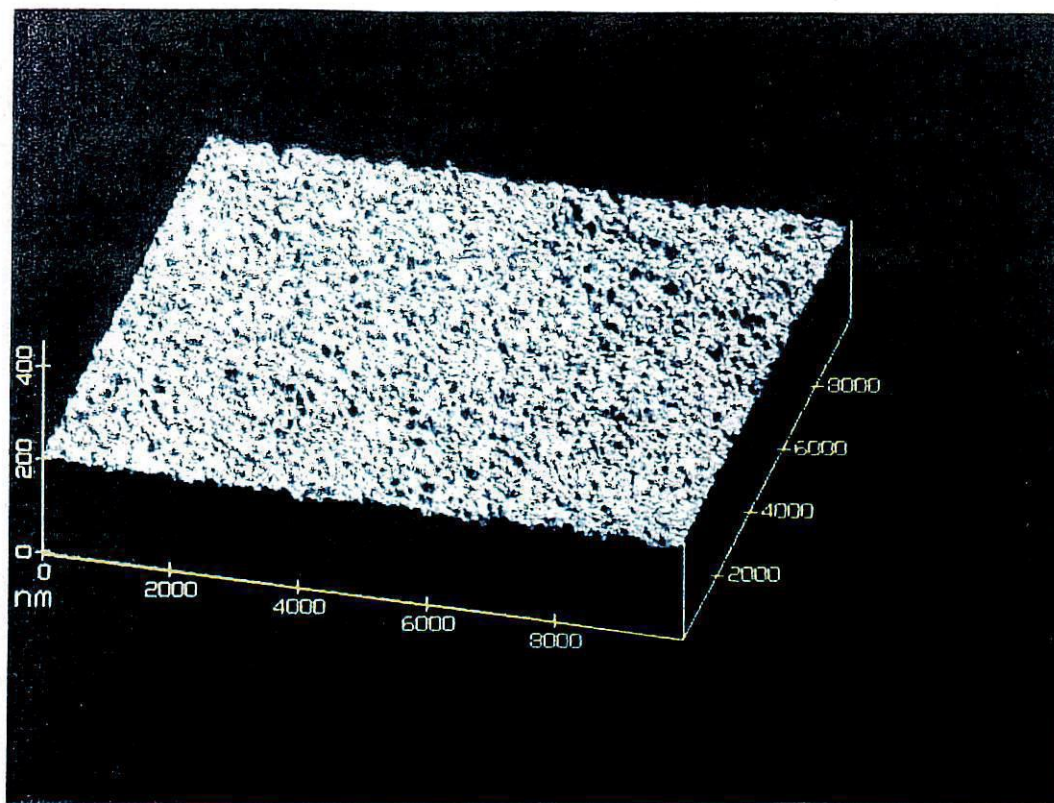


未加工部分

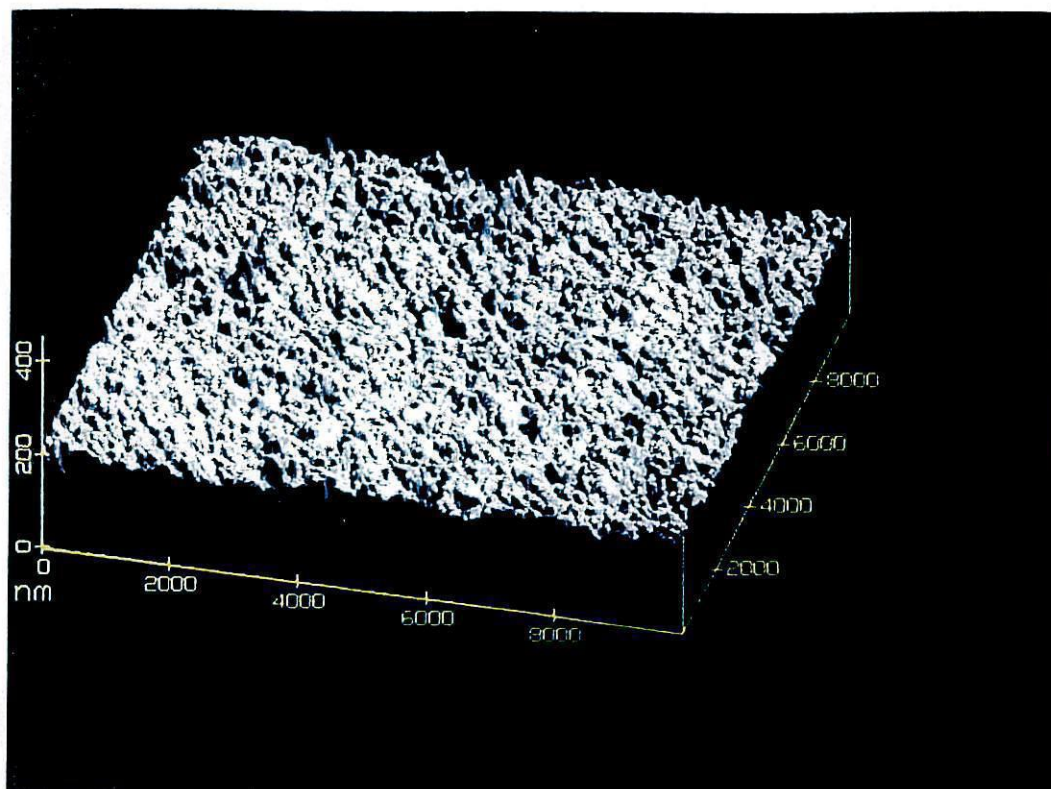


Al_2O_3 (0.06 μm)

図 6.12 A F M 観 察 写 真



Al_2O_3 ($0.3 \mu\text{m}$)



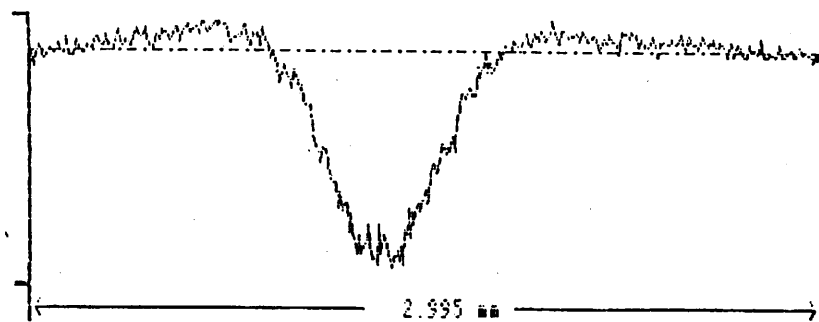
Al_2O_3 ($1.0 \mu\text{m}$)

図 6.12 A F M 観 察 写 真

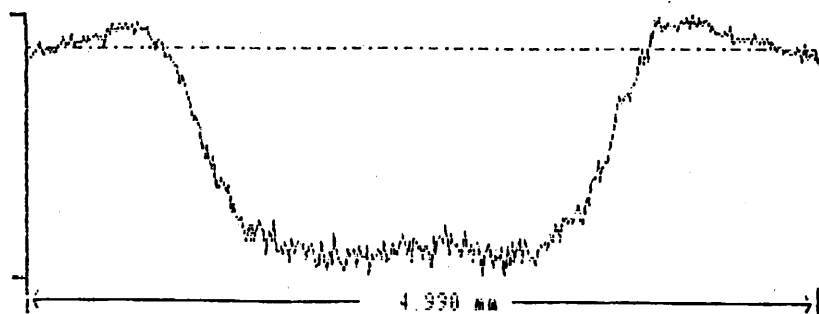
階で金属のローラーを用いて厚さが整えられている。したがって、未加工部のAFM観察像には、金属ローラー表面の形状がそのまま転写されているためか、なめらかな面のなかに窪みが所々点在している。しかしながら、 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ の粒径の砥粒を使用し研磨した試料の場合には、その窪みがなくなっていることがわかる。したがって、 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 程度の砥粒を用いて研磨すると、極めてなめらかな研磨面が得られるといえる。粒径 0.3 、 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ の砥粒で研磨した試料の場合には、無数のピット状の加工痕が点在する様子がAFM観察からわかる。粒径 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ と $1.0\text{ }\mu\text{m}$ の砥粒を用いることにより得られた研磨面を比較すると、粒径 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ の砥粒の場合には、ピット状の加工痕の径が大きいことがわかる。以上の観察結果から、図6.11に示される表面粗さの値となったのも十分理解できる。

6.3.2 平面研磨加工に関する実験結果と考察

次に、本研磨方が平面研磨に適用可能かどうか検討するために、試料台を水平方向に移動させて研磨を行った。送りの範囲を 4 mm とし、送り速度を $10\text{ }\mu\text{m/s}$ と



定位置研磨加工



平面研磨加工

図 6.13 研磨面プロフィール

して実験を行った。

図 6.13 に、溝研磨と平面研磨によって得られた研磨面のプロフィールを示す。試料台に水平方向送りをかけることによって、良好な平面が得られることがわかる。

図 6.14 に、送り回数と表面粗さの関係を示す。実験は、水ベース磁性流体を使用し、砥粒径を $1.0\ \mu\text{m}$ 、 $0.3\ \mu\text{m}$ の 2 通りに変え、また、ポリシャは B、磁石は C を使用して行った。図 6.14 から、表面粗さはある研磨回数で最大の値となり、その後は小さくなっていく様子が見える。これは、加工試料としてポリシ加工した Si ウエハを用いているためである。ミラー面の Si ウエハの表面粗さは極めて優れているため、研磨初期には表面を荒らすかたちとなるが、研磨回数を重ねるごとに表面粗さは、その条件で加工可能な値に近づいていくと考えられる。また、これらの実験から、溝研磨のときの場合と同様に、砥粒径が小さい方が良好な研磨面が得られることがわかった。

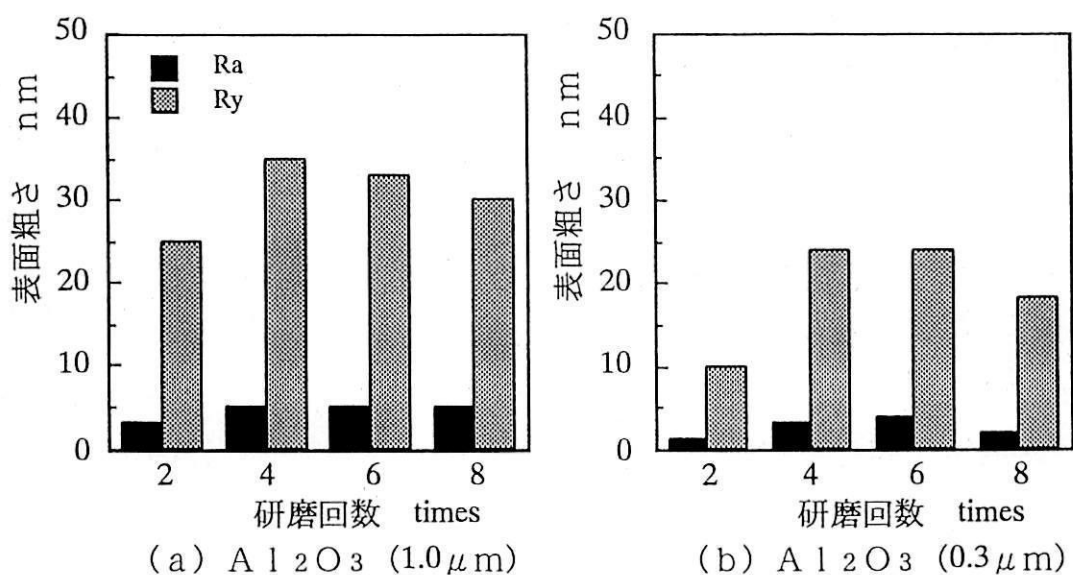


図 6.14 研磨回数と表面粗さの関係

図 6.15 に、磁性流体と表面粗さの関係を示したものである。研磨回数はいずれも 4 回としている。これらを見ると、磁性流体の種類の違いによる表面粗さの変化はほとんど見られず、溝研磨と同様に表面粗さは使用する砥粒径に依存していることがわかる。

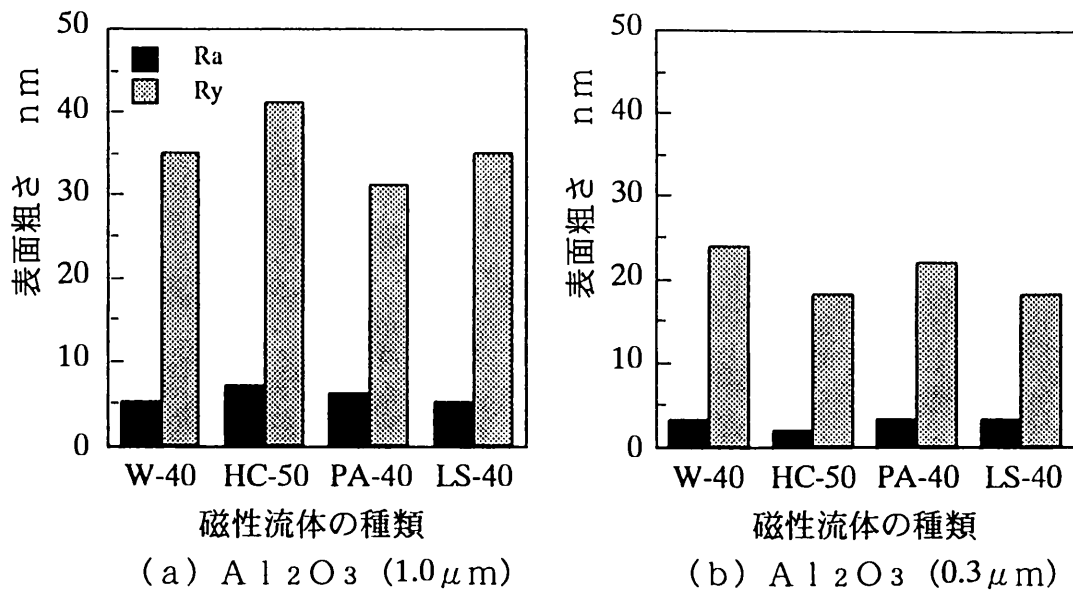


図 6.15 磁性流体と表面粗さの関係

6.4 本章のまとめ

研削加工機と一体化した流体研磨機械の開発を目的に、磁性流体を利用した平面研磨装置を試作してSiウエハの研磨実験を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 磁性流体内の砥粒分布は永久磁石の磁場によって決まり、研磨深さは砥粒分布位置と研磨位置が一致したとき最大となる。
- (2) 磁性流体の粘度と研磨深さの相関は見られず、研磨深さについては、粘度よりも砥粒と磁性流体の親和性などの他の要因が強く影響する。
- (3) 表面粗さについては永久磁石や磁性流体の種類に関係なく、砥粒径に強く依存する。
- (4) カップ形ポリシャ方式の採用により、効率よく平面研磨が行えることが確認された。

第7章 総括

情報機器や精密機器が高性能化，高機能化，そして小型化するのにもともなって，それらの構成要素である硬ぜい性材料部品には安価で高能率な加工法が求められている。しかし，これらの部品に対して要求される形状精度や表面粗さも一段と厳しくなり，ナノメータオーダの加工精度が求められることも多くなっている。

本研究では，このように高能率化と高精度化という相矛盾した加工法が要求されるような状況をふまえ，F F F加工の概念より発案された磁性スラリーを利用した新しい加工法を提唱し，硬ぜい性材料の研磨実験を行うことにより，本加工法の実用化の可能性について実験的検討を行った。

本研究で開発した2つ非接触型研磨装置は，磁性流体を利用することで研磨槽を必要としない研削砥石型の加工法に基礎を置いている。すなわち，研削加工機と研磨加工機を一体化したような加工装置である。本研磨装置は，ポリシャと被加工物の間に一定のクリアランスを設けて流体研磨を行うものであるため，被加工物に対して垂直方向への加工圧力は低減し，良好な仕上げ面を得ることができると期待できる。平形ポリシャ方式研磨装置は，一点で研磨を行うため，非球面の研磨にも応用されることが考えられる。それに対してカップ形ポリシャ方式研磨装置は，広い研磨面を持つため，能率良く平面の創成を行うことができると思われる。

以下に2つの研磨装置による実験結果をまとめ，本研磨法の実用化への可能性を検討して総括とする。

平形ポリシャ方式研磨装置の場合は，永久磁石の磁気力の作用により，ポリシャに磁性スラリーを保持することが可能である。このため，加工液を溜める研磨槽が必要でなくなるとともに，加工物の移し変えも削除できる。このことにより，加工プロセスの短縮化が可能である。加工量は，加工時間，ポリシャの回転数，クリアランス，研磨半径，磁性スラリー溶媒（磁性流体）の種類，加工点付近の磁場強度，砥粒濃度，等の各パラメータを制御することによって調整し得る。一方，加工面の表面粗さは基本的には使用する砥粒径に依存して決まる。微細な砥粒を使用すればナノメータオーダの表面粗さを得ることが可能となる。初期研磨面をラップ加工面とした場合においても，最終的にはポリシ加工面と同程度の表面粗さに仕上げ得る

ことが明らかとなった。研磨面の形状創成に関しても、クリアランスや送り速度を変化させることにより、任意の形状の加工面が得られることが明らかとなった。

一方、カップ形ポリシャ方式研磨装置の場合には、平形ポリシャ方式研磨装置とほぼ同等の研磨能力を有することが明らかになった。しかしこの場合、様々な磁力を有する永久磁石を使用して加工を行っているので、磁場の変化によって加工量がどのように変わるかは、なかなか決め難いので幾分問題が残る。しかし、平面研磨の場合の研磨能力は、その機構上から考えて平形ポリシャ方式研磨装置を上回っている。

以上の実験結果から、本加工法は、加工液を溜める研磨槽や加工物の移し換えを必要としないため、加工プロセスの短縮化が計られる研磨法といえる。また、良好な研磨面も得られ、加工量を数十ナノオーダーからミクロンオーダーの範囲で制御できることから、本研磨法は形状創成の要望にもある程度応えられるように思われる。特に、平形ポリシャを高精度なNC研削加工機に搭載することで、平面の研磨だけでなく、球面、非球面の研磨にも対応できると考えられる。

本研究より、本加工法を用いることによって、加工能率、形状精度、仕上げ面粗さを同時に向上できる可能性が確認された。

参考文献

- 1) 黒部利次：F F F 加工，光技術コンタクト， 32, 2 (1994) 115.
- 2) T.Kurobe,O.Imanaka：Magnetic Field-Assisted Fine Finishing,prec.Eng., 6, 3 (1984) 119.
- 3) 黒部利次，示野和弘，今中 治：磁性流体利用の作用砥粒数制御研磨，精密工学会， 54, 8 (1988) 15 25.
- 4) 森 勇蔵，津和秀夫，杉山和久：E E M (elastic emission machining) の基礎研究（第 1 報）－極微小量弾性破壊の概念とその可能性－，精密機械， 43, 5 (1997) 542.
- 5) 谷口紀男：ナノテクノロジーの基礎と応用，工業調査会，(1988) 103.
- 6) 神山新一：磁性流体入門，産業図書 (1989)
- 7) 武富 荒，近角聡信：磁性流体－基礎と応用－，日刊工業新聞社，(1988)
- 8) 黒部利次：磁性流体による精密研磨技術，機械と工具， 8 (1984) 54.
- 9) 富田幸雄：水力学－流れの現象の基礎と構造－，実教出版株式会社，(1982)
- 10) 粉体工学便覧：粉体工学会編，日刊工業新聞社，(1986) 344.
- 11) 粉体工学の基礎：粉体工学の基礎編集委員会編，日刊工業新聞社，(1992) 207.
- 12) J.G.A.BITTER：Wear， 6 (1963) 5 169.
- 13) 神保元二ほか：微粒子ハンドブック，朝倉書店，(1991) 86.